

**MARCOS JOSÉ NOVAKOSKI**

**CÁLCULO DE PRESSÕES E VAZÕES EM REDES HIDRÁULICAS**

**CURITIBA-PR**

**2005**

**MARCOS JOSÉ NOVAKOSKI**

**CÁLCULO DE PRESSÕES E VAZÕES EM REDES HIDRÁULICAS**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciências, Curso de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia - Área de Concentração em Programação Matemática, Setores de Ciências Exatas e de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Profa. Liliana Madalena Gramani Cumin, Dra.

**CURITIBA - PR**

**2005**

# **TERMO DE APROVAÇÃO**

**MARCOS JOSÉ NOVAKOSKI**

## **CÁLCULO DE PRESSÕES E VAZÕES EM REDES HIDRÁULICAS**

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências, no Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia - Programação Matemática, da Universidade Federal do Paraná, pela comissão formada pelos professores:

Aprovado por:

---

**Profa. Liliana Madalena Gramani Cumin, Dra.**  
**(Presidente)**

---

**Prof. Dionísio Burak, Dr.**

---

**Profa. Tâmia Marta Yamamoto, Dra.**

---

**Prof. Volmir Eugênio Wilhelm, Dr.**

*À minha querida esposa Eliane, à minha filha Tamiris e ao meu filho João, pela paciência, amor e inspiração, cujos meios de mensuração não ousou procurar.*

*Ao meu pai, in memoriam, pelo exemplo de retidão e honestidade que marcaram para sempre minha vida e à minha mãe: força, brilho e obstinação que me ajudam a transpor as barreiras de minha própria ignorância.*

*"O homem deverá empenhar seus melhores esforços e energias em buscar a si mesmo. Saberá prevenir-se contra o engano das aparências para conhecer-se tal como é em realidade. Encontrar-se-á na humildade de seu coração, na inocência de sua alma, na pureza de seu espírito e daí, com a mente limpa e resplandecente, experimentará as excelências inefáveis da vida superior."*

*Carlos B.G.Pecotche*

## **Agradecimentos**

Agradeço profundamente ao Criador, sempre O guia a manter-me firme e inspirado a cumprir a Sua vontade.

Agradeço à minha orientadora, Profa. Dra. Lillian Madalena Gramani Cumin, pela dedicação, paciência e apoio nunca negados em todos os momentos de sua orientação.

Agradeço aos meus colegas, companheiros e amigos de mestrado, cujas lembranças dos bons e maus momentos marcaram de modo singular minha existência.

Agradeço particularmente ao Prof. Dr. Osmar Ambrosio de Souza pelo empenho em propiciar condições físicas e intelectuais para o bom desenvolvimento do curso.

Agradeço à Elizangela Ap. Toledo, Sandra E. Pulga, Joelma Cheidt, Dona Dina e a todos, do departamento de Pós-Graduação e Mestrado, da UNICENTRO, pois a caminhada foi mais amena com a sua sempre disposta ajuda e apoio.

Agradeço à Maristela, do CESEC da UFPR, sempre alegre e pronta a propiciar ajuda que me orientasse pelos meandros que envolvem um curso desse nível, qualidade e envergadura.

Agradeço também às Professoras Maria Teresinha A. Steiner e Neida M. Patias Volpi e aos Professores Celso Carnieri, Anselmo Chaves Neto, Volmir E. Wilhelm e Jair Mendes Marques que, com sua sabedoria e discernimento, souberam me guiar pelos caminhos nem sempre fáceis e, por vezes, turbulentos, até o saber.

## Resumo

Nesta dissertação estuda-se o problema do cálculo de pressões e vazões em redes hidráulicas, através de alguns métodos numéricos amplamente difundidos. O estudo dessas pressões e vazões pode levar à constatação da existência de pressões variáveis, dependendo de fatores físicos diferentes. A determinação e o cálculo das pressões e vazões possivelmente existentes nos nós de redes de tubulações, pode ser elemento de significativo interesse por entidades que trabalhem com a mensuração dessas vazões e pressões. O problema abordado, consiste na formulação do modelo matemático visando minimizar o tempo computacional e a utilização de alguns métodos numéricos: de linearização, de Newton-Raphson e de Gauss com pivoteamento. Os estudos foram conduzidos seguindo a aplicação do método da linearização em relação às vazões e buscando a formatação dos cálculos através de programa computacional em linguagem Pascal, o que propiciou o levantamento de informações que permitem a verificação das pressões que possivelmente existem nos nós das redes. Foram realizados testes em duas redes hidráulicas com informações simuladas, relativo a uma rede malhada, na primeira simulação e uma rede malhada com um trecho fictício, na segunda simulação, obtendo-se, com essas simulações, resultados, referentes às perdas de carga, velocidade, pressão e vazão existentes nas redes, que podem servir de base para aperfeiçoamento no programa computacional, com intuito de incluir bombas e válvulas em seus cálculos e correspondentes aplicações em redes de distribuição de água, por usuários de companhias que realizam a distribuição de água.

**Palavras-chave:** pressão, vazão, redes hidráulicas, métodos numéricos, programa computacional.

## Abstract

In this work, it is studied the problem of pressures and flows in hydraulic nets, through some numeric methods. The study of the flows in nets of hydraulic pipelines the existence of variable pressures is verified, depending on different physical factors. In the problems of determining the pressures and the flows wich occur in the knots of piping nets, can be a significant element of interest for entities that work with the measurement of those pressures and flows. The problem approached also consists of the formulation of the mathematical model that aims at minimizing the computational time and the use of some numeric methods, namely, of linearizing, Newton-Raphson and Gauss's. The studies were led by following the application of the method of the linearizing in relation to the flows, through computer program in Pascal language, which has provided information that allows the verification of the pressures existent in the net knots. Tests were accomplished in two hydraulic nets with simulate information. With the worked simulations, the results obtained can serve as a basis for improvement in the computer program, with the intention of including bombs and valves in its calculus and correspondent applications in nets of water distribution by users of companies of net of water distribution.

**Key-words:** pressure, flow, hydraulic nets, numeric methods, computer programs.



# Conteúdo

|   |          |
|---|----------|
| <b>Resumo</b>                           | vi       |
| <b>Abstract</b>                         | vii      |
| <b>1 Introdução</b>                     | <b>1</b> |
| 1.1 Problema                            | 2        |
| 1.2 Objetivo                            | 2        |
| 1.2.1 Objetivo Geral                    | 2        |
| 1.2.2 Objetivo Específico               | 2        |
| 1.3 Justificativa                       | 2        |
| 1.4 Metodologia                         | 3        |
| 1.5 Limitações do Trabalho              | 3        |
| 1.6 Estrutura do Trabalho               | 4        |
| <b>2 Conceitos Trabalhados</b>          | <b>5</b> |
| 2.1 Sistema de Unidades                 | 5        |
| 2.2 Conceitos Elementares de Hidráulica | 6        |
| 2.2.1 Trechos                           | 7        |
| 2.2.2 Anel                              | 7        |
| 2.2.3 Nó                                | 7        |
| 2.2.4 Pressão                           | 7        |
| 2.2.5 Vazão ou Descarga                 | 8        |
| 2.2.6 Perda de Carga                    | 8        |
| 2.3 Classificação dos Escoamentos       | 8        |
| 2.4 Equação da Continuidade             | 9        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 2.5      | Rede de Distribuição de Água . . . . .              | 10        |
| 2.6      | Cálculo das Redes . . . . .                         | 11        |
| 2.7      | Fórmulas para Cálculo em Canalizações . . . . .     | 12        |
| 2.8      | Fórmula de Darcy . . . . .                          | 13        |
| 2.9      | Fórmula de Darcy-Weisbach . . . . .                 | 13        |
| 2.10     | Coeficiente de Atrito $f$ . . . . .                 | 14        |
| 2.11     | Limites de Aplicação das Fórmulas . . . . .         | 14        |
| 2.12     | Fórmula de Hazen-Williams . . . . .                 | 16        |
| 2.13     | Fórmula de Hazen-Williams - Considerações . . . . . | 16        |
| 2.14     | Emprego da Fórmula de Hazen-Williams . . . . .      | 17        |
| 2.15     | Conceitos de Métodos Numéricos . . . . .            | 17        |
| 2.15.1   | Matriz Esparsa . . . . .                            | 18        |
| 2.15.2   | Sistemas de Equações Lineares . . . . .             | 19        |
| 2.15.3   | Método de Eliminação Gaussiana . . . . .            | 20        |
| 2.15.4   | Método de Newton-Raphson . . . . .                  | 21        |
| <b>3</b> | <b>Programa Computacional</b>                       | <b>23</b> |
| 3.1      | Algumas Considerações . . . . .                     | 23        |
| 3.2      | Modelo Matemático . . . . .                         | 24        |
| 3.2.1    | Sistemas de Equações . . . . .                      | 24        |
| 3.2.2    | Processo Iterativo . . . . .                        | 26        |
| 3.3      | Implementação Computacional . . . . .               | 28        |
| 3.3.1    | Programa Computacional . . . . .                    | 28        |
| 3.3.2    | Execução do Programa . . . . .                      | 28        |
| 3.3.3    | Arquivo de Dados . . . . .                          | 29        |
| 3.3.4    | Precisão Desejada . . . . .                         | 30        |
| 3.3.5    | Número de Iterações . . . . .                       | 30        |
| 3.3.6    | Código de Sistema de Unidades . . . . .             | 31        |
| 3.3.7    | Número de Nós . . . . .                             | 31        |
| 3.3.8    | Fluxos Externos e Cotas dos Nós . . . . .           | 31        |
| 3.3.9    | Quantidade de Trechos na Rede . . . . .             | 32        |
| 3.3.10   | Dados Referentes aos Trechos . . . . .              | 32        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 3.3.11   | Pressões Conhecidas . . . . .              | 32        |
| 3.3.12   | Quantidade de Anéis na Rede . . . . .      | 33        |
| 3.3.13   | Dados Referentes aos Anéis . . . . .       | 33        |
| 3.3.14   | Saída dos Resultados . . . . .             | 33        |
| 3.3.15   | Fluxograma . . . . .                       | 33        |
| 3.4      | Simulações e Aplicações . . . . .          | 34        |
| 3.4.1    | Primeira Simulação . . . . .               | 35        |
| 3.4.2    | Comentários sobre os Resultados . . . . .  | 39        |
| 3.4.3    | Análise por Trecho . . . . .               | 40        |
| 3.4.4    | Segunda Simulação . . . . .                | 41        |
| 3.4.5    | Comentários da Segunda Simulação . . . . . | 43        |
| <b>4</b> | <b>Conclusões e Sugestões</b>              | <b>48</b> |
| 4.1      | Conclusões . . . . .                       | 48        |
| 4.2      | Sugestões para Trabalhos Futuros . . . . . | 49        |
| <b>A</b> | <b>Programa Vazão1</b>                     | <b>51</b> |
| <b>B</b> | <b>Fórmula Práticas</b>                    | <b>70</b> |
|          | <b>Referências Bibliográficas</b>          | <b>71</b> |

# Lista de Figuras

|      |  |    |
|------|--|----|
| 2.1  | Escoamento forçado . . . . .   | 9  |
| 2.2  | Escoamento livre . . . . .   | 9  |
| 2.3  | Rede malhada . . . . .   | 10 |
| 2.4  | Rede ramificada . . . . .  | 10 |
| 2.5  | Fluxos de entrada e saída de um nó. . . . .                          | 12 |
| 2.6  | Anel de uma rede. . . . .  | 12 |
| 2.7  | Interpretação geométrica do método de Newton-Raphson . . . . .       | 22 |
| 3.1  | Rede malhada com dois anéis . . . . .                                | 24 |
| 3.2  | Janela principal do turbo pascal 7.0. . . . .                        | 29 |
| 3.3  | Janela com opções de criação ou leitura de arquivo de dados. . . . . | 29 |
| 3.4  | Janela de criação de arquivo de dados. . . . .                       | 30 |
| 3.5  | Janela de saída de resultados no turbo pascal 7.0. . . . .           | 34 |
| 3.6  | Fluxograma do programa de cálculo de pressões e vazões. . . . .      | 35 |
| 3.7  | Rede malhada 1 para simulação . . . . .                              | 36 |
| 3.8  | Saída dos resultados na tela primeira simulação. . . . .             | 40 |
| 3.9  | Rede malhada 2 para simulação . . . . .                              | 42 |
| 3.10 | Saída dos resultados na tela segunda simulação. . . . .              | 46 |
| B.1  | Ano de desenvolvimento de fórmulas práticas. . . . .                 | 70 |

# Lista de Tabelas

|      |  |    |
|------|--|----|
| 2.1  | Grandezas Fundamentais em Sistema Internacional . . . . .      | 6  |
| 2.2  | Grandezas utilizadas em hidráulica em sistema inglês . . . . . | 6  |
| 2.3  | Coeficientes de Hazen-Williams . . . . .                       | 18 |
| 3.1  | Informações simuladas - informações dos trechos . . . . .      | 36 |
| 3.2  | Informações simuladas - fluxos dos nós . . . . .               | 36 |
| 3.3  | Arquivo de dados simula1.dat . . . . .                         | 37 |
| 3.4  | Significados da tabela 3.3 . . . . .                           | 38 |
| 3.5  | Arquivo de saída simula1.txt . . . . .                         | 39 |
| 3.6  | Arquivo de saída (nó de referência 2) simula1.txt . . . . .    | 39 |
| 3.7  | Informações simuladas - informações dos trechos . . . . .      | 43 |
| 3.8  | Informações simuladas - fluxos dos nós . . . . .               | 43 |
| 3.9  | Arquivo de dados simula2.dat . . . . .                         | 44 |
| 3.10 | Significados da tabela 3.9 . . . . .                           | 45 |
| 3.11 | Arquivo de saída simula2.txt . . . . .                         | 46 |
| 3.12 | Arquivo de saída (nó de referência 1) simula2.txt . . . . .    | 47 |

# Capítulo 1

## Introdução

O presente trabalho apresenta um estudo do cálculo de pressões e vazões em redes hidráulicas, por meio de modelos matemáticos que se valem na sua construção de métodos numéricos dentre eles: os de linearização, de Newton- Raphson e de Gauss com pivotamento.

O problema proposto para estudo trata da construção de um modelo matemático, por meio de simulações que minimizem o tempo de processamento das informações e se justifica por buscar adaptações de modelos que otimizem a pressão das redes hidráulicas no processo de distribuição de água.

O estudo empírico se fez por meio de duas simulações com dados também simulados que envolvem as variáveis: número de anéis, número e medidas dos trechos, componentes dos trechos, tipos de rede, diâmetro da tubulação, índice de rugosidade, origem e destino dos nós dentre outros. Na primeira simulação foi usado uma rede malhada com anéis apenas. A segunda simulação usou-se ainda, uma rede malhada envolvendo um pseudo-anel. Os resultados obtidos não foram submetidos à comparação com resultados de outros estudos.

O trabalho comenta os resultados oriundos das simulações e apresenta sugestões sobre os modelos estudados pelo programa computacional em linguagem Pascal. Nas sugestões apresenta indicativos para a necessidade de aperfeiçoamento do sistema computacional e adequações para o cálculo de pressões e vazões.

## **1.1 Problema**

O problema consiste na realização do cálculo de pressões e vazões existentes em redes de tubulações hidráulicas, através da formulação do modelo matemático, oriundo de estudos realizados sobre essas redes, visando minimizar o tempo computacional desses cálculos.

## **1.2 Objetivo**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho é estudar as pressões e vazões existentes em redes de tubulações de distribuição de água e adequação das formulações a algoritmos computacionais em linguagem pascal a alguns métodos numéricos, entre os quais os de linearização, de Newton-Raphson e de Gauss com pivoteamento.

### **1.2.2 Objetivo Específico**

O objetivo específico deste trabalho é a adaptação dos conceitos de hidráulica estudados, relativos ao cálculo de pressão e vazão em redes de distribuição de água, aos métodos numéricos pesquisados, de modo a se poder dar um tratamento computacional às informações simuladas, sobre as redes de distribuição hidráulica.

## **1.3 Justificativa**

A construção de redes hidráulicas, em especial às de distribuição de água, podem envolver a preocupação com a adequada pressão contida na passagem desse líquido pelas tubulações, desde sua origem (reservatórios principais) passando por redutores e reservatórios secundários, até a sua chegada nos terminais de distribuição e consumo.

Pressões elevadas podem provocar rompimentos em determinados pontos ou nós da rede e pressões insuficientes podem ser prejudiciais à distribuição de modo que, a preocupação com o controle e adequação de pressões e utilização de redutores e válvulas

constitui um trabalho em que modelos matemáticos conhecidos podem vir a ser adaptados para otimização das pressões em sua distribuição.

Como trabalho preliminar, o estudo de cálculos que propiciem o dimensionamento das pressões e vazões em redes de distribuição hidráulica podem fornecer subsídios para a adequação, em novos estudos, de eventuais acréscimos de válvulas redutoras de pressão e bombas que incrementem as vazões.

## **1.4 Metodologia**

Na realização dos estudos, a pesquisa realizada envolveu aspectos bibliográficos referenciados neste trabalho, buscando-se embasamento teórico que fundamentasse as atividades desenvolvidas e a forma de estudo, em relação às informações contidas nos conceitos de hidráulica e de métodos numéricos apresentados, foi o descritivo, em que buscou-se a adequação dos conceitos sobre hidráulica pesquisados, entre eles, os relativos a redes de distribuição de água e suas componentes, as formulações e propriedades inerentes a essas redes e a alguns métodos numéricos existentes, tais como os de linearização, de Newton-Raphson e de Gauss para solução de sistemas lineares, com pivoteamento.

## **1.5 Limitações do Trabalho**

Ao se realizar os cálculos de pressões e vazões, objetiva-se estabelecer meios de se estimar essas pressões e vazões, com intuito de viabilizar estudos que comprovem empiricamente aperfeiçoamentos em redes de distribuição de água.

O trabalho envolveu a utilização de conceitos teóricos amplamente difundidos na literatura sobre o tema, com a posterior adequação de um programa computacional às idéias contidas no trabalho, não levando-se em conta pesquisas de campo, e que poderão ser realizadas oportunamente.

A realização do trabalho está concentrada somente nos cálculos com dados simulados e poderão ser utilizados por entidades e empresas que realizem medições de pressão e vazão em redes de distribuição de água.

Ao se efetuar o estabelecimento de dados para testes empíricos, foram desconside-



radas as características geológicas que eventualmente possam interferir no processo de cálculo das pressões e vazões existentes em redes de distribuição de água.

Os métodos de cálculos para os modelos matemáticos utilizados são os difundidos na literatura sobre análise numérica e cálculo numérico, referenciados neste trabalho, não sendo desenvolvidos métodos próprios e nem comparações com métodos formulados por outros pesquisadores.

## **1.6 Estrutura do Trabalho**

O trabalho está dividido em quatro capítulos, levando-se em conta também a introdução.

No primeiro capítulo são explanados alguns aspectos introdutórios do trabalho, buscando fornecer uma visão geral do estudo realizado.

No segundo capítulo, realiza-se um estudo sucinto dos conceitos de hidráulica, que propiciaram a base para o desenvolvimento das formulações e algoritmos do programa computacional desenvolvido e são evidenciados alguns conceitos de métodos numéricos que foram utilizados na adequação do problema inicial e no posterior desenvolvimento do programa computacional.

No terceiro capítulo, realiza-se a adequação dos conceitos hidráulicos aos conceitos de métodos numéricos utilizados e a formulação dos modelos matemáticos através de dados simulados em relação às redes hidráulicas. Neste capítulo também são descritos os procedimentos de implementação computacional e avaliação dos resultados e informações oriundas das experimentações realizadas, com os dados simulados e são elencados os dados simulados sobre duas redes de distribuição de água, com suas características, sua correspondente adequação ao modelo computacional desenvolvido e os resultados fornecidos pelo programa, com algumas interpretações em relação aos resultados obtidos.

E, no quarto capítulo, são efetivadas as conclusões em relação ao trabalho desenvolvido e realizadas sugestões para o prosseguimento das atividades em oportunidades futuras.

## Capítulo 2

### Conceitos Trabalhados

Neste capítulo realiza-se a conceituação e apresentação de idéias inerentes à hidráulica, amplamente difundidas na literatura sobre o tema, tais como a classificação dos escoamentos, a equação de continuidade, redes hidráulicas com suas componentes e algumas especificidades, além de serem apresentadas algumas fórmulas fundamentais no cálculo da perda de carga ao longo dos percursos envoltos nessas redes, através de suas tubulações.

É realizado também a apresentação de alguns conceitos de métodos numéricos utilizados nos algoritmos desenvolvidos, para cálculos das pressões e vazões em redes hidráulicas, tais como as idéias sobre matriz esparsa, sistemas de equações lineares, o método de eliminação gaussiana e o método de Newton-Raphson para equações lineares.

#### 2.1 Sistema de Unidades

Para realização de estudos utilizou-se do Sistema Internacional de unidades, que, segundo Brasil (2002, p. 1), foi adotado oficialmente no Brasil desde 1962, com base em nove grandezas fundamentais básicas, conforme se verifica na tabela 2.1.

Neste trabalho, foram considerados o Sistema Internacional de Medidas e o sistema inglês. No Sistema Internacional o fluxo (vazão) é representado em litros por segundo e no sistema inglês em galões por minuto. A cota ou elevação de cada nó é representada em metros no Sistema Internacional e em pés no sistema inglês.

| Grandezas fundamentais   | Símbolo      | Unidade    | Sist.Intern. |
|--------------------------|--------------|------------|--------------|
| Comprimento              | L, l         | metro      | m            |
| Massa                    | m            | quilograma | kg           |
| Tempo                    | t            | segundo    | s            |
| Força                    | F            | Newton     | N            |
| Intens.Corrente elétrica | I            | ampére     | A            |
| Pressão                  | P            | Pascal     | Pa           |
| Temperatura              | $\theta$ , T | Kelvin     | K            |
| Quantidade matéria       | $\eta$       | mole       | mol          |
| Intensidade luminosa     | I            | candela    | cd           |

Tabela 2.1: Grandezas Fundamentais em Sistema Internacional

A tabela 2.2 contém algumas unidades das grandezas utilizadas na hidráulica, no sistema inglês.

| Grandezas fundamentais | Símbolo | Unidade | Sist.inglês |
|------------------------|---------|---------|-------------|
| Comprimento            | L, l    | pé      | ft          |
| Massa                  | m       | libra   | lb          |
| Tempo                  | t       | segundo | s           |
| Volume                 | v       | galão   | gal         |

Tabela 2.2: Grandezas utilizadas em hidráulica em sistema inglês

Seguem-se a seguir, alguns conceitos básicos de hidráulica que embasaram parte das atividades desenvolvidas para realização deste trabalho.

## 2.2 Conceitos Elementares de Hidráulica

Os estudos desenvolvidos pautaram-se em aspectos que envolvem especificidades físicas na adequação de formulações em redes de distribuição de água.

Determinados conceitos, relativos à engenharia hidráulica, podem propiciar elementos que fornecem a base para o desenvolvimento dessas formulações, de acordo com o que segue:

### **2.2.1 Trechos**

Segundo Garcez (1976, p. 87), trechos podem ser considerados os encanamentos ou as tubulações em que ocorrem as trajetórias percorridas pelo líquido conduzido ao longo de sua extensão.

### **2.2.2 Anel**

Garcez (1976, p. 73) relata anel como um conjunto de tubulações que é disposto em formato poligonal podendo ser fechado, quando não possuem ramificações interligadas e que se unam a outros trechos. Há a possibilidade de ser considerado o pseudo-anel, em que tubulações fictícias são associadas à rede para completar sistemas de cálculos que exijam o trabalho com anéis.

### **2.2.3 Nó**

Baptista (2003, p. 115) remete à idéia de que nó refere-se as junções que interligam duas ou mais tubulações, que se unem, para a ocorrência de escoamento do líquido que passa pelos trechos por elas compostas.

### **2.2.4 Pressão**

De acordo com Baptista (2003, p. 41), pode-se descrever pressão como sendo a razão existente entre a força normal incidente sobre área da base considerada plana, de um determinado objeto que apoia-se na superfície de incidência de pressão. Considerar-se-á neste estudo, como força, a existente por ocasião da passagem da água pelas tubulações que compõe suas redes de distribuição, e a área de incidência é constituída pela secção transversal hipoteticamente realizada nas tubulações em seus nós ou junções, podendo ser representada pela expressão 2.1, a seguir:

$$P = \lim_{A \rightarrow 0} \frac{F}{A}, \quad (2.1)$$

em que,  $P$  denota a pressão num ponto,  $F$  representa a força normal à superfície e  $A$  a área da superfície ou secção.

### 2.2.5 Vazão ou Descarga

Delmée (2003, p. 6), conceitua vazão ou descarga como o volume líquido que escoar através de uma secção (de um tubo) por unidade de tempo (hora, minuto, segundo, etc, no Sistema Internacional), podendo ser representada pela expressão 2.2, a seguir:

$$Q = \frac{V}{t}, \quad (2.2)$$

em que,  $Q$  denota a vazão em determinado trecho,  $V$  representa o volume de líquido que passa por esse trecho e  $t$  a unidade de tempo em que ocorre o escoamento.

### 2.2.6 Perda de Carga

Segundo Baptista (2003, p. 67), a perda de carga é constituída pela variação do nível da linha de energia em dois pontos quaisquer tomados em um escoamento.

## 2.3 Classificação dos Escoamentos

Para Baptista (2003, p. 43), os escoamentos podem ser classificados de duas maneiras: *forçados* ou *livres*.

*Escoamento forçado* (figura 2.1)<sup>1</sup>: é o que ocorre quando a pressão, como as que incidem nas tubulações de recalque e sucção de bombas ou nas redes de abastecimento de água, é diferente da atmosférica.

*Escoamento livre* (figura 2.2)<sup>2</sup>: se dá quando a pressão na superfície do líquido iguala-se à da atmosférica, podendo a forma de condução desse líquido ser aberto, como

---

<sup>1</sup>Fonte: Baptista, 2003

<sup>2</sup>Fonte: Baptista, 2003

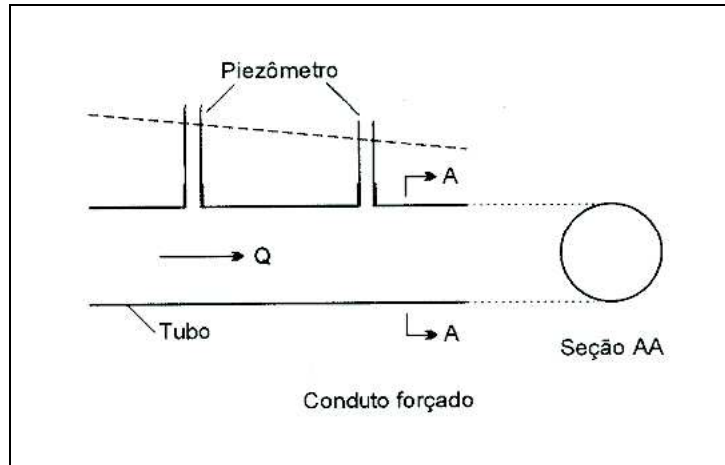


Figura 2.1: Escoamento forçado

no caso dos canais fluviais, ou fechado, como as consideradas nas redes de coleta de esgoto sanitário.

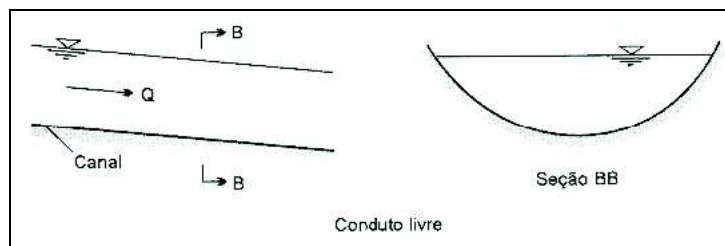


Figura 2.2: Escoamento livre

## 2.4 Equação da Continuidade

Em Baptista (2003, p. 48) o tratamento dado à equação da continuidade pode ser estabelecida como consequência da lei de conservação de massa, que estabelece que a massa não pode ser criada ou destruída, ou seja, a soma dos fluxos que chegam em um nó é igual a soma dos fluxos que saem do mesmo nó, podendo ser expressa pela equação 2.3, a seguir:

$$Q_1 + Q_2 + \dots + Q_i = F_j, \quad (2.3)$$

em que  $Q_i$  constitui a vazão em determinado trecho  $i$ ,  $F_j$  representa o fluxo externo que entra ou sai do conduto pelo nó que interliga os trechos  $j$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ ; com  $n \in \mathbb{Z}$  e  $j = 1, 2, \dots, m$ ; com  $m \in \mathbb{Z}$ .

## 2.5 Rede de Distribuição de Água

Para Garcez (1976, p. 73), uma rede hidráulica pode ser constituída por um conjunto de tubulações (trechos), anéis e nós que compõem um sistema de distribuição de água ou outros fluídos.

As redes de distribuição de água podem ser classificadas de acordo com a configuração assumida pelos condutos, decorrentes da forma como foram construídas, podendo ser *malhadas* ou *ramificadas*:

*Rede hidráulica malhada* (figura 2.3)<sup>3</sup>: rede construída em formato próximo do retangular, podendo haver entrelaçamento de tubulações também aproximadamente retangulares.

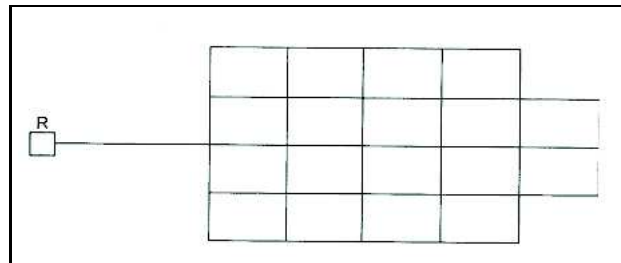


Figura 2.3: Rede malhada

*Rede hidráulica ramificada* (figura 2.4)<sup>4</sup>: rede com ramos ou interligações, não necessariamente em formato retangulares que, geralmente são construídos à medida em que são estruturados.

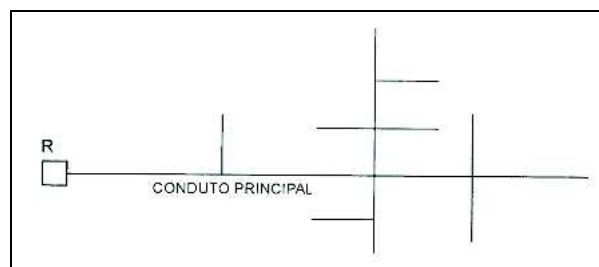


Figura 2.4: Rede ramificada

---

<sup>3</sup>Fonte: Baptista, 2003

<sup>4</sup>Fonte: Baptista, 2003

## 2.6 Cálculo das Redes

Baptista (2003, p. 113) considera que em redes ramificadas pode-se admitir que as vazões estejam distribuídas ao longo das tubulações ou canalizações que as compõe de modo uniforme, podendo também ser denominadas vazão de distribuição em fluxo ou em marcha. Assim tem-se a expressão 2.4:

$$q_m = Q/L, \quad (2.4)$$

em que,  $q_m$  refere-se à vazão de distribuição em marcha,  $L$  é o comprimento total da rede e  $Q$  é a vazão total que abastece a rede.

Em redes malhadas, Baptista (2003, p. 115) expõe a possibilidade de se poder considerar as vazões existentes nas tubulações, isto é, que estejam concentradas nos nós, sendo tratadas como centros em que ocorrem o consumo das áreas que são atendidas pela rede que distribui a água.

A vazão entre dois nós consecutivos da rede é considerada uniforme, o que pode facilitar a análise. Para que seja possível proceder a determinação das pressões existentes numa rede malhada, pode ser necessário determinar a vazão incidente em cada trecho da correspondente rede, considerando-se:

1) *O princípio da continuidade*, ou seja, a soma dos fluxos que chegam em um nó é igual a soma dos fluxos que saem do mesmo nó (figura 2.5), ou seja, o expresso pelas equações 2.5 e 2.6, a seguir:

$$\sum_{i=1}^4 Q = 0 \quad (2.5)$$

$$F_1 - Q_1 - Q_4 = 0 \quad (2.6)$$

em que  $Q_1$  representa a vazão no trecho 1,  $Q_1$  e  $Q_2$  iguais a zero,  $Q_4$  a vazão no trecho 4 e  $F_1$  diz respeito ao fluxo de entrada no nó 1 e com  $i = 1, \dots, n$  e  $i, n \in Z$

2) *O princípio da conservação da energia*, ou seja, a soma das perdas de carga nos condutos que formam o anel é zero. Para tanto, atribui-se à perda de carga o mesmo sentido da vazão e convencionam-se o sentido horário como positivo e o outro sentido como negativo (figura 2.6), ou seja, o expresso pelas equações 2.7 e 2.8, a seguir:

$$\sum_{i=1}^4 \Delta h = 0 \quad (2.7)$$

$$h_1 - h_2 - h_3 - h_4 = 0 \quad (2.8)$$



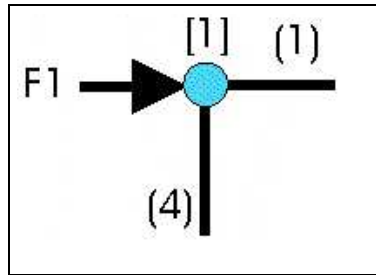


Figura 2.5: Fluxos de entrada e saída de um nó.

em que  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$  e  $h_4$ , representam as perdas de carga em seus respectivos trechos, incidentes em um dos nós de ligação da rede de distribuição de água.

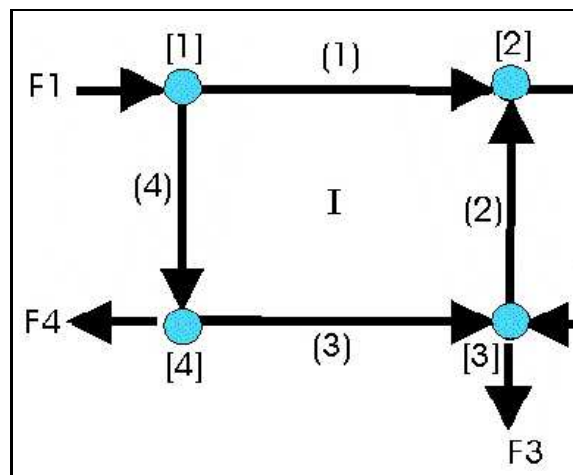


Figura 2.6: Anel de uma rede.

## 2.7 Fórmulas para Cálculo em Canalizações

Azevedo Neto (1982, p. 181) relata que existe um número considerável de fórmulas para o cálculo de canalizações, o que pode suscitar dúvidas sobre qual o melhor critério de escolha ao se trabalhar com questões envolvendo esse setor da hidráulica.

O mesmo autor cita que Chézy em 1775, formulou o que pode ser considerada uma primeira expressão que, algebricamente, procurou exprimir a resistência ao longo de canalizações. Várias foram as equações cuja proposta tinha a mesma meta, sendo que algumas dessas continuam a ser reproduzidas em manuais de Hidráulica.

Azevedo Neto (1982, p. 182), comenta sobre a adoção da fórmula mais adequada a determinado tipo de tubulação, ou situação em que estejam dispostas as redes de distribuição de água, e sugere que o conhecimento da forma como foram obtidas suas gene-

realizações<sup>5</sup> sejam considerados, haja vista que as variações podem ser relevantes quando duas ou mais fórmulas forem comparadas.

## 2.8 Fórmula de Darcy

Para Azevedo (1982, p. 183), o pesquisador Francês Henry Darcy, em 1857, nos seus estudos, procurou considerar a natureza e o estado em que se encontravam as paredes das tubulações, representando uma inovação em relação às fórmulas desenvolvidas e consideradas antes de sua divulgação.

Na realização de seus experimentos, Darcy considerou aproximadamente duzentas observações, obtendo uma fórmula com utilização e aplicação difundida amplamente na literatura sobre o tema. Ao se verificar o expoente  $n$  da velocidade na expressão 2.9, a seguir:

$$h = \lambda \frac{v^n}{d^m}, \quad (2.9)$$

em que,  $h$  representa a perda de carga,  $\lambda = \frac{f}{2g}$  evidencia que  $f$  depende do número de Reynolds e  $g$  é a aceleração da gravidade,  $v$  é a velocidade relativa entre o fluido e a superfície sólida e  $d$  constitui o diâmetro da tubulação e  $m$  o expoente dependendo do material que compõe a tubulação.

Ainda segundo Azevedo (1982, p. 183), o expoente  $n$  está compreendido entre 1,76 e 2,00. No entanto, Azevedo ainda salienta que Darcy adotou o expoente  $n = 2$  para, ao que parece, facilitar o seu manejo e o seu uso através da fórmula que desenvolveu.

Os estudos efetuados por Darcy referem-se à utilização de tubos novos e considerou, quando a tubulação estava envelhecida, o dobro dos coeficientes utilizados.

## 2.9 Fórmula de Darcy-Weisbach

De acordo com Giles (1971, p. 147) a fórmula de Darcy-Weisbach é a base para o cálculo da perda de carga para o escoamento de fluidos em tubos e condutos. A equação pode ser descrita pela expressão 2.10, a seguir:

$$hf = \frac{fLQ^2}{D2gA^2}, \quad (2.10)$$

---

<sup>5</sup>Vide Apêndice B

em que,  $g$  denota a aceleração da gravidade,  $hf$  a perda de carga,  $A$  refere-se a área da secção transversal,  $f$  é o fator de fricção,  $L$  é o comprimento do trecho,  $Q$  a vazão calculada para o trecho e  $D$  representa o diâmetro da secção transversal no trecho.

## 2.10 Coeficiente de Atrito $f$

Em hidráulica, segundo Lencastre (1972, p. 65), o coeficiente de atrito  $f$  é função do número de Reynolds  $Re$  e da rugosidade relativa  $e$ . De acordo com Azevedo (1982, p. 196) se o escoamento for calmo ou também conhecido por escoamento laminar, o coeficiente de atrito pode ser mensurado pela relação expressa pela equação 2.11, a seguir:

$$f = \frac{64}{Re}, \quad (2.11)$$

em que,  $f$  é o fator de fricção e  $Re$  é o número de Reynolds.

Caso o escoamento seja agitado, também chamado de escoamento turbulento, a equação do fator de fricção, segundo Walski (2002, p. 16), poderá ser representada pela relação 2.12, a seguir:

$$f = \frac{1,325}{\left[ \ln \left( \frac{e}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2}, \quad (2.12)$$

em que,  $f$  é o fator de fricção,  $e$  o coeficiente de rugosidade da tubulação,  $D$  o diâmetro da tubulação e  $Re$  o número de Reynolds.

## 2.11 Limites de Aplicação das Fórmulas

Ao se utilizar as fórmulas nas aplicações envolvendo tubulações, é recomendável que seus limites de aplicação sejam considerados, em que podem ser estabelecidos os diâmetros mínimo e máximo, fixados em geral, pelos próprios pesquisadores que desenvolveram as equações e, dependendo das utilizações a que se destinem, ser estipulados pelos engenheiros ou responsáveis pelas suas aplicações, nas redes em que sejam necessárias serem empregadas.

Estabelecer critérios para decisão sobre qual fórmula atenderá melhor às solicitações oriundas do problema que se estiver tratando pode depender do grau de conhecimento em relação às diversas variantes existentes, tanto em relação às informações que

serão necessárias (diâmetro, estado da tubulação, comprimento e elevação dos tubos, etc) para alimentar às formulações, quanto do grau de precisão desejado em cada situação, o que impede, inclusive, comparações entre as existentes, por trabalharem com informações distintas.

No caso da fórmula de Darcy, esta foi generalizada a partir de aproximadamente duzentas observações por parte do pesquisador e é reconhecida e validada (Azevedo, 1982) como sendo de boa precisão a mais de um século.

A formulação determinada por Darcy completou seu centenário a alguns anos, e algumas outras que surgiram depois tem diferença de poucos anos.

Segundo Azevedo (1982, p. 182), com o passar desse tempo, ocorreram modernizações na forma como as canalizações são construídas e nos tipos de materiais que as compõe, permitindo que hajam tubulações com comprimento maior, diminuindo o número de junções, e com nível de rugosidade interna menor, o que obrigou determinados pesquisadores a realizarem novas pesquisas, sobre a viabilidade da adoção das antigas fórmulas ou na adequação das já existentes às evoluções que naturalmente ocorriam na forma como os materiais são desenvolvidos e posteriormente confeccionados.

Além dos fatores relativos às especificidades dos materiais constituintes dos tubos, existem ainda os inconvenientes referentes à determinação de quando uma tubulação pode ser considerada nova ou envelhecida; de como são caracterizadas as águas a serem transportadas ou sobre sua disposição nos leitos que dão origem aos reservatórios.

Ainda considerando Azevedo (1982, p. 185), ao realizarem estudos e observações, os pesquisadores embrenhados nessas questões, inferiram que o valor do expoente de  $v$  da fórmula de Darcy (2.9) verifica-se entre 1,7 e 2,0. Para este trabalho, adota-se o valor médio 1,85, como aproximação inicial. O próprio Darcy, em seus experimentos, determinou valores de  $n$  que estão compreendidos entre 1,76 e 2,0.

Osborne Reynolds (1842-1912), ao estudar as velocidades-limite entre os escoamentos laminar e turbulento, concluiu que o expoente  $n$  possui o valor 1 para o escoamento laminar e que, para os escoamentos turbulentos que se observam empiricamente, têm o valor de  $n$  dependendo da rugosidade da superfície interna dos tubos, e que oscilam entre 1,73 e 2,0.

## 2.12 Fórmula de Hazen-Williams

De acordo com Azevedo (1982, p. 186) e Walski, *et al.* (2000, p. 17), a fórmula de Hazen-Williams é oriunda de amplas investigações realizadas por Allen Hazen, engenheiro civil e sanitário, e Gardner S. Williams, professor de Hidráulica, pesquisadores norte-americanos, com base em dados estatísticos obtidos por mais de trinta outros investigadores, incluindo-se os resultantes dos estudos de Darcy, além dos decorrentes das próprias pesquisas, propondo, em 1903, uma fórmula prática que pode ser representada pela expressão 2.13, como segue:

$$hf = \frac{4,73L}{C_{hw}^n D^{4,87}} \cdot Q^n \quad (2.13)$$

em que,  $hf$  representa a equação da perda de carga pela fórmula de Hazen-Williams,  $L$ , o comprimento do trecho  $i$ ,  $C_{hw}$  é o coeficiente de Hazen-Williams,  $n$  constitui um valor próximo de dois,  $Q$  é a vazão calculada ou estimada para determinado trecho e  $D$  é o diâmetro da secção transversal em determinado trecho.

Essa formulação ficou conhecida como sendo de Hazen-Williams e segundo Cassidy, *et al.* (1998, p. 160) é bem aceita entre os engenheiros hidráulicos e, de acordo com o que se observa nas obras publicadas sobre conceitos de engenharia hidráulica, é bem ajustada em casos estudados empiricamente.

## 2.13 Fórmula de Hazen-Williams - Considerações

A formulação obtida por Allen Hazen e Gardner S. Williams tem o mérito, conforme exposto, de ter sido generalizada com base em um cuidadoso estudo estatístico em que foram considerados, além de dados obtidos por outros pesquisadores, os realizados por observações dos próprios autores.

Considerando-se tubos com o mesmo grau de rugosidade, o expoente  $n$  inerente à fórmula foi estabelecido de modo a ter menor variação para o coeficiente numérico  $C_{hw}$ .

O que se percebe é que, o coeficiente  $C_{hw}$ , aproxima-se de uma função que varia praticamente em decorrência da natureza das paredes do tubo.

Pela aceitação que a fórmula obteve, foi possível que se obtivessem valores bem definidos para o coeficiente  $C_{hw}$  o que, em tais condições, permite estimar o grau de envelhecimento das tubulações que a eles se referem.

Essa formulação apresenta a propriedade de poder satisfazer de maneira apropriada aplicações em condutos fabricados com os mais diversos tipos de material.

[...]A fórmula de Hazen-Williams pode ser aplicada a condutos livres ou condutos forçados: tem sido empregada para canalizações de águas e esgotos. Seus autores basearam-se em experiências com os seguintes materiais (tubos): aço, cimento, chumbo, estanho, ferro forjado (wroughtiron), ferro fundido, latão, madeira, tijolos e vidro.<sup>6</sup>

Embora as investigações realizadas por Hazen e Williams tenham incluído dados sobre canalizações com diâmetro entre 25 mm e 4500 mm, seus limites de aplicação atualmente estão entre dimensões que variam de 50 mm a 3500 mm.

## **2.14 Emprego da Fórmula de Hazen-Williams**

Azevedo (1982, p. 188) menciona que o emprego da fórmula desenvolvida por Hazen e Williams se dá de modo generalizado nos Estados Unidos, Canadá e México, sendo que na América Latina passou a ser difundida após 1920 onde, no Brasil, pode-se citar Henrique de Novaes como sendo um dos primeiros a utilizá-la, no Rio de Janeiro, para cálculo de grandes canalizações.

A escolha do coeficiente  $C_{hw}$ , da fórmula de Hazen-Williams depende diretamente do tipo de tubulação que configura a rede de distribuição hidráulica. O estado das tubulações também podem ser levados em consideração, dependendo da composição do material e de sua qualidade.

Segundo Azevedo (1982, p. 187), podem ser citados alguns coeficientes amplamente utilizados, conforme tabela 2.3.

## **2.15 Conceitos de Métodos Numéricos**

Neste capítulo são apresentados alguns conceitos de métodos numéricos utilizados nos algoritmos desenvolvidos, para cálculos das pressões e vazões em redes hidráulicas,

---

<sup>6</sup>Fonte: Azevedo, 1982

| Tubos   | Valor do coeficiente $C_{hw}$ |
|---|-------------------------------|
| Aço corrugado (chapa ondulada)                        | 60                            |
| Aço com juntas lock-bar, novos                        | 130                           |
| Aço galvanizado (novos e em uso)                      | 125                           |
| Aço rebitado, em uso                                  | 85                            |
| Aço rebitado, novo                                    | 110                           |
| Aço soldado com revestimento especial, novos e em uso | 130                           |
| Aço soldado, em uso                                   | 90                            |
| Aço soldado, novo                                     | 120                           |
| Chumbo  | 130                           |
| Cimento-amianto                                       | 140                           |
| Cobre   | 130                           |
| Concreto, acabamento comum                            | 120                           |
| Concreto, bom acabamento                              | 130                           |
| Ferro fundido, em uso                                 | 90                            |
| Ferro fundido, novo                                   | 130                           |
| Ferro fundido, tubos revestidos de cimento            | 130                           |
| Grés cerâmico vidrado (manilhas)                      | 110                           |
| Latão   | 130                           |
| Madeira, em aduelas                                   | 120                           |
| Plástico  | 140                           |
| Tijolos, condutos bem executados                      | 100                           |
| Vidros  | 140                           |

Tabela 2.3: Coeficientes de Hazen-Williams

tais como as idéias sobre matriz esparsa, sistemas de equações lineares, o método de eliminação gaussiana e o método de Newton-Raphson para equações lineares.

### 2.15.1 Matriz Esparsa

De acordo com Sperandio (2003, p. 57) uma matriz esparsa é a que tem uma quantidade expressiva de elementos nulos. Como exemplo, pode-se citar a matriz 2.14, abaixo considerada e, segundo esse autor, esparsa.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 5 & 0 \\ 0 & 7 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & -2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 6 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -2 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

### 2.15.2 Sistemas de Equações Lineares

Sperandio (2003, p. 66) relata que um sistema de equações lineares, como o representado pelo sistema 2.15, que possua  $m$  equações e  $n$  incógnitas pode ser escrito na forma:

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + \dots + a_{1n}x_n = b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + \dots + a_{2n}x_n = b_2 \\ \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + a_{m3}x_3 + \dots + a_{mn}x_n = b_m \end{cases} \quad (2.15)$$

em que  $a_{ij}, b_i, i = 1, 2, \dots, m$  pertencem ao conjunto dos números reais e  $j = 1, 2, \dots, n$  pertence ao conjunto dos números inteiros. Toda  $n$ -upla  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , que satisfaz a cada uma das equações do sistema 2.15 é dita uma solução do sistema. Em notação matricial, o sistema 2.15 pode ser escrito como o representado pelas expressões 2.16 e 2.17, ou seja:

$$AX = B \quad (2.16)$$

em que

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix}. \quad (2.17)$$



### 2.15.3 Método de Eliminação Gaussiana

Burden (2003, p. 312) discorre sobre a eliminação Gaussiana como um método direto para solução de sistemas de equações lineares que determina a solução exata do sistema através de um número finito de procedimentos que podem ser conhecidos antecipadamente. Relata que o tempo computacional, em termos de processamento, em qualquer método direto, pode ser estimado por meio do número de iterações que o envolvem.

Sperandio (2003, p.68) mostra que a principal idéia desse método é transformar o sistema 2.15, sendo  $m=n$ , através de operações mais simples em matrizes, num sistema cuja matriz dos coeficientes seja triangular superior. Os coeficientes  $a_{ij}$  com  $i < j$  podem ser transformados com o seguinte algoritmo:

1. Faz-se  $a_{ij}^{(1)} = a_{ij}$ ,  $1 \leq i \leq n$  e  $1 \leq j \leq n+1$ , com  $a_{i(n+1)} = b_i$ .
2. Para  $k = 1, 2, \dots, n-1$ ,  $i = k+1, k+2, \dots, n$  e  $j = k+1, k+2, \dots, n+1$ , calcula-se

$$m_{ik} = \frac{a_{ik}^{(k)}}{a_{kk}^{(k)}} \quad (2.18)$$

com

$$a_{kk}^{(k)} \neq 0 \quad (2.19)$$

e

$$a_{ij}^{(k+1)} = a_{ij}^{(k)} - m_{ik} a_{kj}^{(k)}. \quad (2.20)$$

Se  $a_{kk}^{(k)} = 0$ , então, segundo Sperandio (2003, p. 68) o sistema será incompatível.

Após  $n-1$  passos, a matriz dos coeficientes, aumentada do vetor constante, passa a ter estrutura triangular:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11}^{(1)} & a_{12}^{(1)} & a_{13}^{(1)} & \dots & a_{1n}^{(1)} & a_{1n+1}^{(1)} \\ 0 & a_{22}^{(2)} & a_{23}^{(2)} & \dots & a_{2n}^{(2)} & a_{2n+1}^{(2)} \\ 0 & 0 & a_{33}^{(3)} & \dots & a_{3n}^{(3)} & a_{3n+1}^{(3)} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_{4n}^{(4)} & a_{4n+1}^{(4)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_{nn}^{(n)} & a_{nn+1}^{(n)} \end{bmatrix}. \quad (2.21)$$

3. Para  $i = n, n-1, \dots, 1$  obtêm-se as incógnitas  $x_n, x_{n-1}, \dots, x_1$  por meio de

$$x_i = \frac{a_{in+1}^{(i)} - \sum_{k=i+1}^n a_{ik}^{(i)} x_k}{a_{ii}^{(i)}}, i = n, n-1, \dots, 1. \quad (2.22)$$

## 2.15.4 Método de Newton-Raphson

De acordo com Sperandio (2003, p. 26) e Ruggiero (1996, p. 66) se supõe que a função  $f$ ,  $f(x) = 0$ , possua desenvolvimento em série de Taylor em torno do ponto  $x = x_n$ . Então

$$f(x) = f(x_n) + (x - x_n)f'(x_n) + (x - x_n)^2 \left( \frac{f''(\xi)}{2!} \right), \quad (2.23)$$

$\xi$  entre  $x$  e  $x_n$ .

Se  $\alpha$  é raiz da equação  $f(x) = 0$ , tem-se

$$f(x_n) + (\alpha - x_n)f'(x_n) + (\alpha - x_n)^2 \left( \frac{f''(\xi)}{2!} \right) = 0, \quad (2.24)$$

$\xi_n$  entre  $\alpha$  e  $x_n$ .

Disso resulta que

$$\alpha = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} - \frac{(\alpha - x_n)^2 f''(\xi)}{2f'(x_n)}, \quad (2.25)$$

$\xi_n$  entre  $\alpha$  e  $x_n$ ,

ou

$$\alpha \approx x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}. \quad (2.26)$$

Denominando o lado direito dessa aproximação de  $x_{n+1}$ , tem-se a seguinte equação de iteração para o Método de Newton-Raphson:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}, \quad (2.27)$$

com  $n = 0, 1, 2, \dots$

A interpretação geométrica do Método de Newton-Raphson é a ilustrada no gráfico expresso pela figura 2.7.<sup>7</sup>

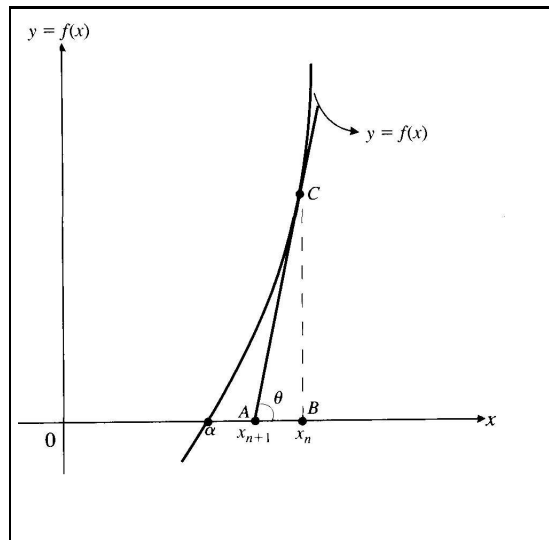


Figura 2.7: Interpretação geométrica do método de Newton-Raphson

No gráfico ilustrado na figura 2.7, o triângulo  $ABC$  permite escrever

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{f(x_n)}{x_n - x_{n+1}}. \quad (2.28)$$

Mas  $\operatorname{tg} \theta = f'(x_n)$ , então  $f(x_n) = f'(x_n)(x_n - x_{n+1})$  e disso resulta a equação de iteração 2.27.

---

<sup>7</sup>Fonte: Sperandio, 2003.

## Capítulo 3

# Programa Computacional

Neste capítulo são expostas algumas considerações sobre como se aplicar os conceitos de métodos numéricos, no cálculo de pressões e vazões em redes hidráulicas, através de uma simulação de rede apresentada genericamente e procurando-se expor como são construídas as equações de continuidade, equações de perda de carga, o sistema de equações lineares que dará origem ao sistema exposto na forma matricial, para posterior aplicação dos algoritmos que apresentarão as soluções para o sistema, através do processo iterativo correspondente.

Descreve-se ainda, o modo como deve-se realizar a utilização das informações para cálculo de pressões e vazões em redes hidráulicas, relatando-se os procedimentos para sua implementação, através da execução do programa turbo pascal 7.0 e apresenta-se o fluxograma do programa desenvolvido.

### 3.1 Algumas Considerações

Este trabalho pretende sugerir uma formulação que permita a análise de redes hidráulicas utilizando-se recursos de um microcomputador. O modelo possibilita calcular, iterativamente, as pressões nos nós, as vazões e perdas de cargas nos tubos, através do método de linearização, que pode conduzir a uma matriz simétrica e esparsa.

O programa calcula as vazões nos trechos (tubos) e as pressões nas junções (nós) de uma rede hidráulica simples (sem bombas e válvulas) pelo Método de Linearização

(em relação as vazões) aplicado às equações de perda de carga para cada anel da rede. Considera que uma rede com tubos, anéis e nós, pode ser representada por um sistema de equações lineares com número de equações e incógnitas igual ao número de tubos. Supõe conhecidas todas as entradas e saídas (fluxos externos), e as cotas dos nós da rede, e ainda, permite a opção de cálculos via um dos dois sistemas de unidades de medidas: Sistema Internacional ou sistema inglês.

## 3.2 Modelo Matemático

A personificação quantitativa de situações que ocorrem em fenômenos naturais ou que tenha sido criada pela ação da natureza humana pode ser representada quando se dispõe de modelos que expressem sua manifestação.

A expressão desses fatores, através de modelos matemáticos, pode conduzir também à solução de problemas que eventualmente surjam nos estudos dessas situações.

Com essas considerações, nas seções seguintes realiza-se a construção um modelo matemático que represente uma rede hidráulica malhada.

### 3.2.1 Sistemas de Equações

Com o objetivo de tornar clara a explanação, pode-se considerar o exemplo a seguir: uma rede hidráulica de distribuição de água com dois anéis, sete trechos, e seis nós, conforme representado pela figura 3.1, a seguir:

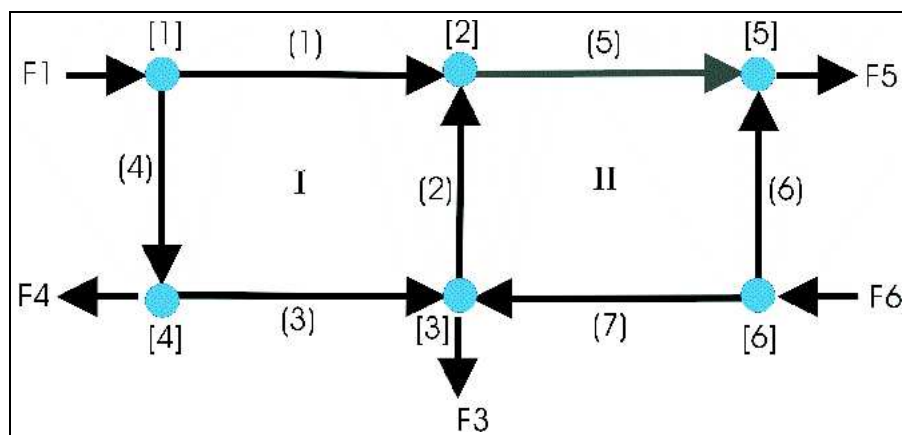


Figura 3.1: Rede malhada com dois anéis

O número de cada nó está representado entre colchetes, o número de cada trecho está entre parênteses e o número de cada anel, em algarismo romano, sendo que a convenção de sinal considera o sentido positivo de percurso, o que coincide com o sentido horário. Em cada nó está indicado o fluxo externo por uma seta; e cada trecho está definido pelo nó origem (tail), nó destino (head), um comprimento ( $L$ ), um diâmetro ( $D$ ) e a rugosidade relativa ( $e$ ). A vazão num trecho é representada por  $Q$ .

O sistema de equações envolvidas na formulação do problema, pode ser dividido em duas partes. A primeira parte consiste de um subsistema de equações lineares originadas das condições de continuidade em cada nó, isto é, a soma dos fluxos que chegam em um nó é igual a soma dos fluxos que saem do mesmo nó. Para o exemplo da figura 3.1, tem-se as equações de continuidade, expressas pelo sistema 3.1, a seguir:

$$\left\{ \begin{array}{ll} Q_1 + Q_4 = F_1 & \text{nó 1} \\ -Q_1 - Q_2 + Q_5 = 0 & \text{nó 2} \\ Q_2 - Q_3 - Q_7 = -F_3 & \text{nó 3} \\ Q_3 - Q_4 = -F_4 & \text{nó 4} \\ -Q_5 - Q_6 = -F_5 & \text{nó 5.} \end{array} \right. \quad (3.1)$$

A segunda parte do sistema consiste das equações não-lineares, obtidas da consideração de que a soma das perdas de carga nos trechos de um anel é nula. A perda de carga em um trecho é calculada pela equação 2.13, deste trabalho, de Hazen-Williams.

Se for considerado que a equação de Hazen-Williams pode ser reescrita no formato  $hp = kQ^{n-1}Q$  em que  $k = \frac{4,73L}{Chw^n D^{4,87}}$ , pode-se obter a forma linearizada da equação de perda de carga, que fica escrita como segue:  $hp = kk.Q$ , em que o coeficiente  $kk$  é obtido a partir de um valor para a vazão na expressão anterior, ou seja,  $kk = k.Q^{n-1}$ .

A segunda parte do sistema de equações para o exemplo considerado pode ser representada pelas equações expressas pelo sistema 3.2, a seguir:

$$\left\{ \begin{array}{ll} kk_1 Q_1 - kk_2 Q_2 - kk_3 Q_3 - kk_4 Q_4 = 0 & \text{anel 1} \\ kk_2 Q_2 + kk_5 Q_5 - kk_6 Q_6 + kk_7 Q_7 = 0 & \text{anel 2.} \end{array} \right. \quad (3.2)$$

O sistema, considerando-se as equações de continuidade, de cada nó, e as equações de perda de carga, de cada anel, expressas pelo sistema 3.3, pode ser assim escrito:

$$\left\{ \begin{array}{ll} Q_1 + Q_4 = F_1 & \text{nó 1} \\ -Q_1 - Q_2 + Q_5 = 0 & \text{nó 2} \\ Q_2 - Q_3 - Q_7 = -F_3 & \text{nó 3} \\ Q_3 - Q_4 = -F_4 & \text{nó 4} \\ -Q_5 - Q_6 = -F_5 & \text{nó 5} \\ kk_1 Q_1 - kk_2 Q_2 - kk_3 Q_3 - kk_4 Q_4 = 0 & \text{anel 1} \\ kk_2 Q_2 + kk_5 Q_5 - kk_6 Q_6 + kk_7 Q_7 = 0 & \text{anel 2.} \end{array} \right. \quad (3.3)$$

Ao se ajustar os coeficientes do sistema 3.3, na sua forma matricial, poder-se-á, através dos métodos numéricos pertinentes, detalhar os valores calculados das vazões em cada trecho da rede assim considerada, como exemplificado abaixo pela equação matricial 3.4:

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ kk_1 & -kk_2 & -kk_3 & -kk_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & kk_2 & 0 & 0 & kk_5 & -kk_6 & kk_7 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \\ Q_5 \\ Q_6 \\ Q_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -F_1 \\ 0 \\ F_3 \\ F_4 \\ F_5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

### 3.2.2 Processo Iterativo

A linearização, como foi comentado na subseção 3.2.1, transforma a equação de perda de carga para cada trecho da rede numa equação linear em relação a vazão da forma  $hf = kk.Q$ .

Assim sendo, ao se arbitrar uma aproximação inicial para as vazões, é possível escrever um sistema de equações lineares cujos coeficientes dependem dos valores aproximados das vazões. A solução de tal sistema pode então ser usada para formar novos coeficientes que dão lugar a um novo sistema de equações lineares. O processo pode se repetir iterativamente até que se obtenha a solução final que satisfaça algum critério de parada. Nesse processo iterativo é usada a fórmula 3.5, a seguir:

$$hf^{(m)} = kk^{(m-1)}Q^{(m)}, \quad (3.5)$$

em que,  $hf^{(m)}$  constitui a perda de carga na iteração  $(m)$ ,  $kk^{(m-1)}$  é o coeficiente calculado para a iteração  $(m-1)$  e  $Q^{(m)}$  é a vazão calculada na iteração  $(m)$ .

Na primeira iteração os coeficientes  $Chw$  e os expoentes  $n$  são fixados conforme a fórmula de Hazen-Williams e as vazões são consideradas unitárias.

Nas iterações posteriores os valores dos coeficientes  $Chw$  e os expoentes  $n$  são calculados pela fórmula de Darcy-Weisbach descrita pela equação 2.10.

O fator de fricção  $f$  é calculado com base no número de Reynolds, descrito pelas equações 2.11 e 2.12.

Com os valores de  $f$  calculados, em função de dois valores da vazão  $Q$  próximos, determinados pelo valor inicial arbitrado em uma unidade e pelo valor calculado pela equação de 2.13, de Hazem-Willians, na primeira iteração, calcula-se pela fórmula exponencial  $f = \frac{a}{Q^b}$ , obtendo-se  $a$  e  $b$  e, destes os valores de  $n$  e  $k$  através das relações  $n = 2 - b$  e  $k = \frac{aL}{2gDA^2}$ , onde  $f$  representa o fator de fricção,  $A$  representa a área da secção transversal do trecho,  $g$  representa a aceleração da gravidade, e os parâmetros  $a$  e  $b$  são determinados, resolvendo as equações exponenciais acima citadas pelo Método de Newton.

Ao se resolver os sistemas, as soluções obtidas em iterações sucessivas podem oscilar em torno da solução final, portanto, sugere-se que após duas iterações consecutivas se tome a média aritmética das duas soluções para o processamento da iteração seguinte.

Além disso, em cada iteração um sistema de equações lineares deve ser resolvido. Este sistema possui uma matriz que não apresenta estrutura com forma especial, embora seja uma matriz esparsa (com muitos elementos nulos). Por isso, optou-se pelo Método de Gauss com pivoteamento para sua resolução. A solução do sistema linear obtida pelo Método de Gauss não é exata, devido aos erros de arredondamento que se propagam



durante o processo computacional do método. Entretanto, esse erro pode ser ignorado em cada iteração do Método de Linearização, visto que a solução do sistema linear numa certa iteração ( $m$ ) representa apenas uma aproximação de ordem ( $m$ ) para as vazões na rede.

### **3.3 Implementação Computacional**

Nesta seção descreve-se o modo como deve-se realizar a utilização das informações para cálculo de pressões e vazões em redes hidráulicas, relatando-se os procedimentos para sua implementação, através da execução do programa turbo pascal 7.0 e apresenta-se o fluxograma do programa desenvolvido.

#### **3.3.1 Programa Computacional**

O programa foi desenvolvido em linguagem pascal, utilizando-se o aplicativo Turbo Pascal 7.0, figura 3.2, que, segundo Palmer (1994, p. 04), constitui linguagem ideal para o aprendizado de programação e contém a maioria dos recursos práticos de programação, servindo também em base estrutural para outros programas para microcomputador tal como o Delphi.

Para compreensão dos procedimentos que devem ser realizados, e o programa desenvolvido em linguagem pascal seja adequadamente implantado, obtendo os resultados para posterior análise, sugere-se o roteiro de execução apresentado nos próximos parágrafos.

#### **3.3.2 Execução do Programa**

Quando se executa o programa, figura 3.3, uma das duas opções seguintes pode ser escolhida:

- digitar 0 (zero) se interessar criar o arquivo de dados para em seguida executar o programa.

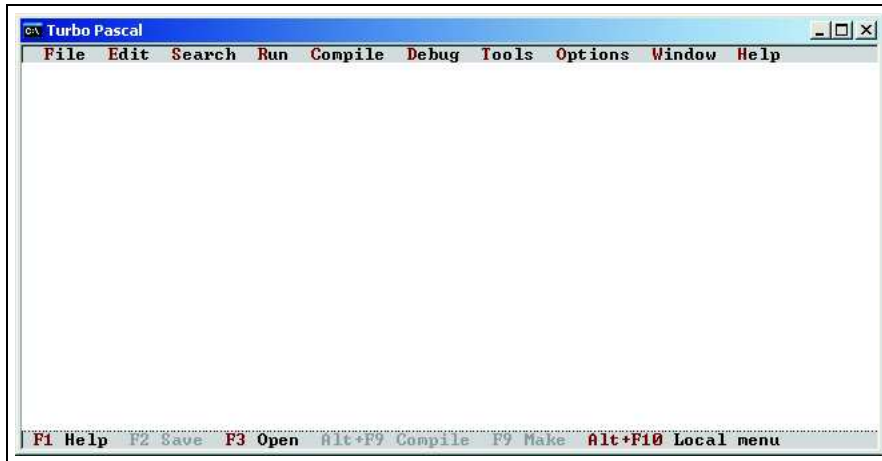


Figura 3.2: Janela principal do turbo pascal 7.0.

- digitar 1 (um) se interessar executar o programa diretamente com algum arquivo de dados existente.

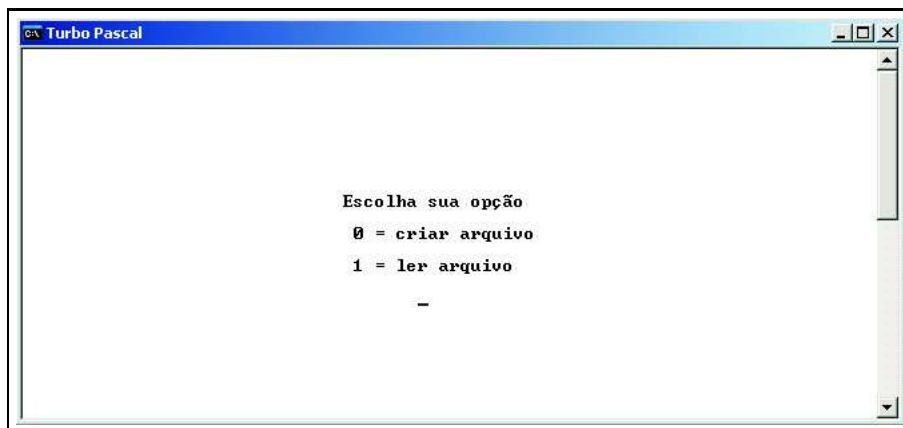


Figura 3.3: Janela com opções de criação ou leitura de arquivo de dados.

Após a opção, o programa pede o nome do arquivo o qual deve ter no máximo 12 caracteres (incluindo a extensão). Exemplo: TESTE001.DAT.

### 3.3.3 Arquivo de Dados

Para criar o arquivo de dados (figura 3.4), após o nome ser digitado, torna-se necessário que os valores dados sejam digitados na seguinte ordem: precisão desejada, número máximo de iterações, sistema de unidades adotado, quantidade nós, valor dos fluxos de entrada ou saída, número de trechos, nó de origem e destino dos fluxos, comprimento dos trechos, diâmetro das tubulações e rugosidade relativa.

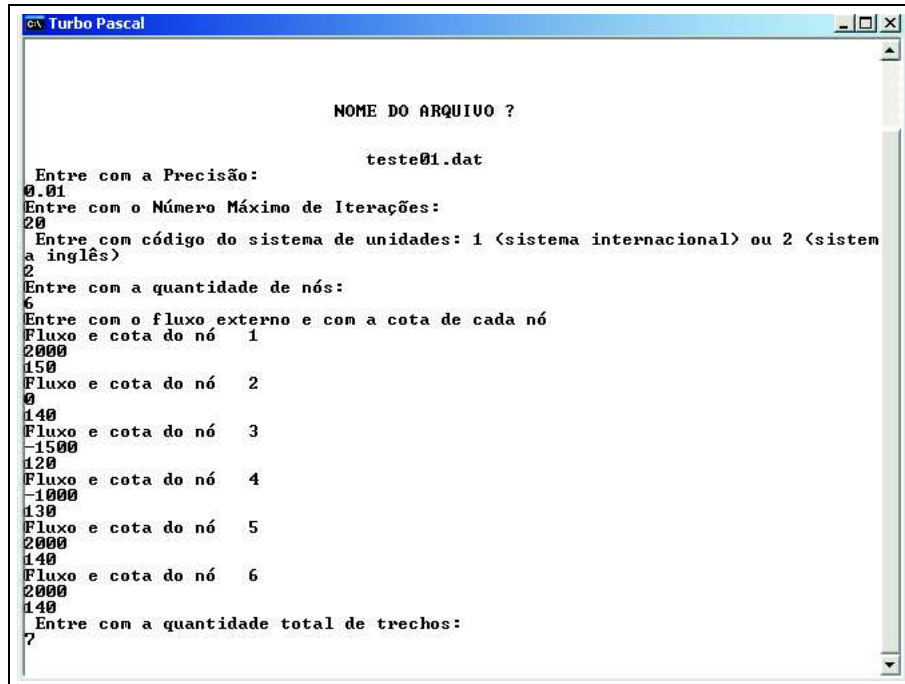


Figura 3.4: Janela de criação de arquivo de dados.

### 3.3.4 Precisão Desejada

Trata-se do erro admissível na resolução do sistema de equações pelo Método de Linearização o qual resolve o problema iterativamente. O erro serve de critério de parada do processo iterativo através da condição:

"A soma das diferenças entre as vazões obtidas em duas iterações consecutivas deve ser menor que o erro admissível."

Sugere-se que o valor para o erro seja da ordem de 0,1 ou 0,01.

### 3.3.5 Número de Iterações

O número de iterações desejado constitui o número máximo que o pesquisador admite como base para o programa realizar o processo iterativo e depende da precisão desejada pelo usuário do sistema.

O programa solicita essa informação, que deve ser expressa, digitando-se o valor desejado.

### **3.3.6 Código de Sistema de Unidades**

O sistema de unidades a ser escolhido depende da necessidade do usuário do sistema, podendo os cálculos ser realizados no Sistema Internacional de Unidades ou no sistema inglês. Na realização da primeira simulação utilizou-se o sistema inglês de unidades e na segunda simulação utilizou-se o Sistema Internacional de Unidades. Para que haja prosseguimento no cálculo das pressões e vazões deve-se:

- Digitar 1 (um) para o Sistema Internacional.
- Digitar 2 (dois) para o sistema inglês.

### **3.3.7 Número de Nós**

Neste ponto do programa, a quantidade de nós que compõe a rede deve ser digitada, para que o sistema possa expressar as equações de perda de carga componentes destes nós.

### **3.3.8 Fluxos Externos e Cotas dos Nós**

A digitação dos valores dos fluxos externos e das cotas ou elevações dos nós, devem ser separados por espaço em branco, para cada nó, observando a ordenação dos nós e a convenção de sinais abaixo:

- Sinal (+) para fluxo que entra na rede (o sinal (+) não deve ser digitado) e
- Sinal (-) para fluxo que sai da rede.

No Sistema Internacional o fluxo (vazão) deve se expresso em litros por segundo e no sistema inglês expresso em galões por minuto.

A cota ou elevação de cada nó deve ser expressa em metros no Sistema Internacional e no sistema inglês expressa em pés.

Caso as cotas dos nós não sejam conhecidas, ou não tiverem importância na análise da rede, deve-se digitar zeros em seus lugares.

### **3.3.9 Quantidade de Trechos na Rede**

Digitar o número total de trechos, inclusive os fictícios que forem inseridos para fechar a rede, quando necessário. Todo trecho deve pertencer a algum anel da rede.

### **3.3.10 Dados Referentes aos Trechos**

Observando a ordenação dos trechos, deve-se digitar para cada trecho os seguintes dados (na mesma linha), separados por espaço em branco, considerando:

- Número do nó origem (tail).
- Número do nó destino (head).
- Comprimento do trecho (em metros ou pés).
- Diâmetro do trecho (em milímetros ou pés).
- Rugosidade (em centímetros ou polegadas).

Caso exista um pseudo-anel, o trecho fictício deve ter comprimento maior que 10.000 unidades e seu diâmetro deve ser menor que 0,01 unidade.

### **3.3.11 Pressões Conhecidas**

Caso existam nós onde as pressões sejam conhecidas (observadas ou pré-fixadas), deve-se digitar a quantidade de nós onde existem pressões conhecidas, e em seguida, digitar aos pares o número do nó e o valor da pressão, separados por espaço branco (um par em cada linha do arquivo).

Caso não existam pressões conhecidas o programa não calcula as pressões nos nós da rede.

### **3.3.12 Quantidade de Anéis na Rede**

A quantidade de anéis é solicitada pelo programa computacional, devendo ser digitado sua quantidade total considerando, inclusive, a quantidade de pseudo-anéis, caso eles existam.

### **3.3.13 Dados Referentes aos Anéis**

Observando a ordenação dos anéis, deve-se digitar os seguintes dados, para cada anel da rede (na mesma linha), separados por espaços em branco e:

- A quantidade de trechos que formam o anel;
- Números dos trechos em qualquer ordem, e precedidos de sinal negativo quando a orientação do trecho não coincidir com o sentido horário de percurso no anel.

### **3.3.14 Saída dos Resultados**

Os resultados são exibidos na tela (figura 3.5), mas existe a opção de gravá-los em um arquivo com nome dado pelo usuário, respeitando o limite de 12 (doze) caracteres, para imprimí-los posteriormente através do sistema operacional. Os valores fornecidos na saída são: as vazões, os coeficientes da fórmula de Hazen-Williams, os expoentes das vazões, as perdas de carga, e as velocidades para os trechos; as pressões e as cotas para os nós.

### **3.3.15 Fluxograma**

O fluxograma (figura 3.6) foi construído, observando-se a ordenação de rotinas executadas pelo programa computacional desenvolvido. Para que o programa possa fornecer os dados ou arquivos de saída deve-se, inicialmente, dar entrada nos dados, através de um arquivo contendo os dados com as informações a serem processadas, ou digitando-as à medida que o programa as solicita.

```

Turbo Pascal
erro= 0.0254
número de iterações= 18
nó
tubo  vazao(Q)  or/dest  k  exp(n)  p.carga  velocidade
      (pes/s)                (ft)      (ft/s)
1      1.0334    1 2  0.2775  1.8046  3.7237  2.9678
2      0.6241    3 2  4.0202  1.7839  0.1553  0.7951
3      1.1945    4 3  0.8025  1.8021  1.4884  2.1913
4      3.4224    1 4  1.6454  1.8192  2.0800  4.3597
5      1.6575    2 5  0.5136  1.8089  3.2271  3.0408
6      1.6843    6 5  0.0862  1.8241  19.5311  8.5823
7      2.7715    6 3  0.1716  1.8263  16.1487  7.9596

nó de referencia= 2
nó  pressão  cota  pressão com cota
    (ft)      (ft)      (ft)
1  103.7237  150.0000  93.7237
2  100.0000  140.0000  100.0000
3  100.1553  120.0000  120.1553
4  101.6437  130.0000  111.6437
5   96.7729  110.0000  126.7729
6  116.3040  140.0000  116.3040
quer gravar os resultados ? s/n
n
quer testar outras condições de contorno? <0 = não, 1 = sim >0

```

Figura 3.5: Janela de saída de resultados no turbo pascal 7.0.

O passo seguinte, seguido pelo programa é a inicialização da solução do problema relativo ao cálculo das pressões, considerando as vazões iniciais iguais à zero, para todos os tubos.

Na seqüência, através de rotinas de procedimentos internas do programa, são armazenadas as equações de continuidade através da procedure equacont.

O próximo procedimento constitui a formação das equações de perda de carga, com a procedure equaneis, cujo resultado será o cálculo de coeficientes de linearização dessas equações de perda de carga.

Realiza-se, após a formação das equações de perda de carga, a resolução do sistema de equações lineares, através da rotina procedure gauss, em que as vazões são calculadas.

No passo seguinte, é realizado o teste de convergência, ou seja, é verificado se o erro previamente estabelecido foi obedecido, do contrário o programa reinicializa a iteração seguinte a partir do ponto em que são formadas as equações de perda de carga. Quando a convergência ocorre, os resultados são expostos na tela e o fluxograma tem sua rotina completa cumprida.

### 3.4 Simulações e Aplicações

Nesta seção são apresentadas duas simulações exemplificando a disposição de duas redes de distribuição de água, sendo uma rede malhada em formato retangular e outra rede malhada retangular com um pseudo-anel. Apresentam-se também os arquivos de dados

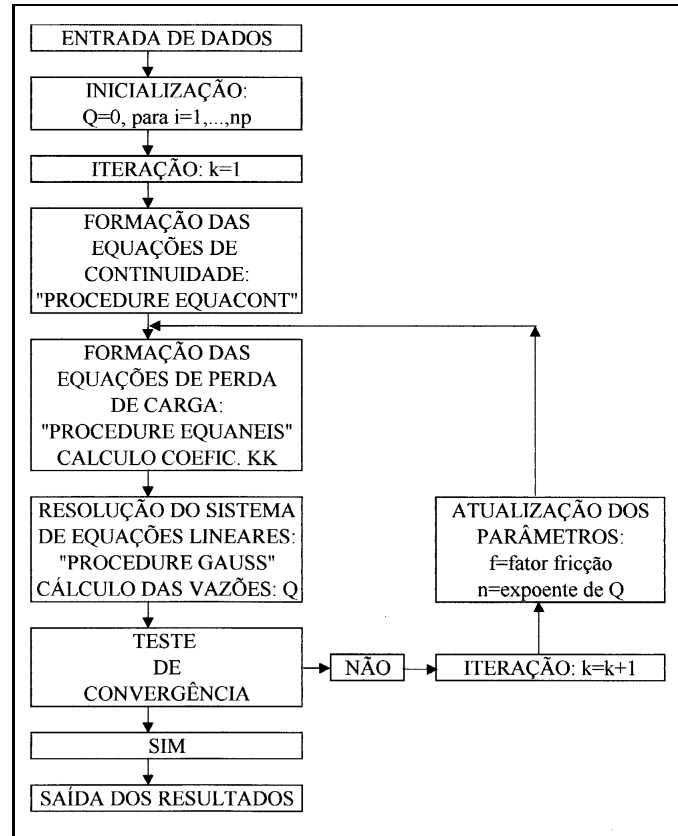


Figura 3.6: Fluxograma do programa de cálculo de pressões e vazões.

com os quais o programa computacional foi implementado e as correspondentes saídas de resultados com comentários e comparações relativos aos dados informados.

### 3.4.1 Primeira Simulação

Considerando-se uma rede de distribuição de água malhada com dois anéis, sete trechos e seis nós, conforme a figura 3.7 e os dados da tabela 3.1 e 3.2, representados no sistema inglês de medidas, tem-se:

Na figura 3.7, os trechos (tubulações) estão representados entre parêntesis, os nós entre colchetes, os fluxos de entrada ou saída por  $F_i$ , com  $i = 1, \dots, 6$  e os anéis em algarismos romanos.

Com essa simulação pretende-se verificar o desempenho do programa computacional e a forma como as informações serão dispostas após o processamento dos dados, para uma rede malhada, ou seja, com os anéis dispostos em formato próximo do retangular.

Os detalhes numéricos das tubulações, relativo à primeira simulação, encontram-se



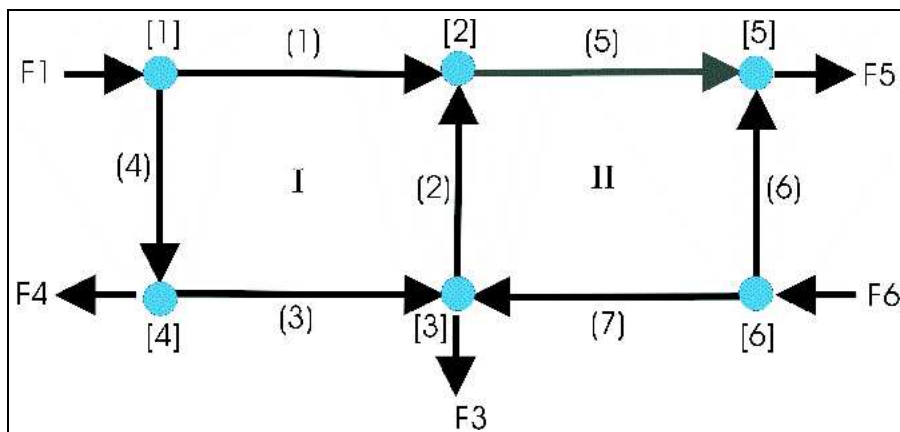


Figura 3.7: Rede malhada 1 para simulação

nas tabelas 3.1 e 3.2.

Informações para o arquivo de dados:

| Trecho | comprim. | diâmetro | rugosidade | nó origem | nó destino | perda carga |
|--------|----------|----------|------------|-----------|------------|-------------|
|        | (pé)     | (pé)     | (pé)       |           |            |             |
| 1      | 800      | 0,666    | 0,0001     | 1         | 2          | 306         |
| 2      | 750      | 1        | 0,0001     | 3         | 2          | 51          |
| 3      | 1000     | 0,833    | 0,0001     | 4         | 3          | 0           |
| 4      | 500      | 1        | 0,0001     | 1         | 4          | 0           |
| 5      | 800      | 0,833    | 0,0001     | 2         | 5          | 400         |
| 6      | 600      | 0,5      | 0,0001     | 6         | 5          | 0           |
| 7      | 800      | 0,666    | 0,0001     | 6         | 3          | 0           |

Tabela 3.1: Informações simuladas - informações dos trechos

| nó | fluxo ext. | cota | nó | fluxo ext. | cota |
|----|------------|------|----|------------|------|
| 1  | 2000       | 150  | 4  | -1000      | 130  |
| 2  | 0          | 140  | 5  | -1500      | 110  |
| 3  | -1500      | 120  | 6  | 2000       | 140  |

Tabela 3.2: Informações simuladas - fluxos dos nós

Como o programa desenvolvido para cálculo de pressões e vazões em redes hidráulicas oferece a opção de criação de arquivo de dados, ou leitura de um arquivo previamente criado, para posterior processamento, construiu-se a tabela 3.3, com as informações numéricas contidas nas tabelas 3.1 e 3.2. Ao lado de cada linha da tabela 3.3 existe uma referência, no formato 3.3.i, com  $i = 1, \dots, 25$ , com os significados dos valores de cada linha correspondente.

Arquivo de entrada: simula1.dat - tabela 3.3

|       |     |      |        |        |        |
|-------|-----|------|--------|--------|--------|
| 0.1   |     |      |        |        | 3.3.1  |
| 20    |     |      |        |        | 3.3.2  |
| 2     |     |      |        |        | 3.3.3  |
| 6     |     |      |        |        | 3.3.4  |
| 2000  | 150 |      |        |        | 3.3.5  |
| 0     | 140 |      |        |        | 3.3.6  |
| -1500 | 120 |      |        |        | 3.3.7  |
| -1000 | 130 |      |        |        | 3.3.8  |
| -1500 | 110 |      |        |        | 3.3.9  |
| 2000  | 140 |      |        |        | 3.3.10 |
| 7     |     |      |        |        | 3.3.11 |
| 1     | 2   | 800  | 0,666  | 0,0001 | 3.3.12 |
| 3     | 2   | 750  | 1      | 0,0001 | 3.3.13 |
| 4     | 3   | 1000 | 0,8333 | 0,0001 | 3.3.14 |
| 1     | 4   | 500  | 1      | 0,0001 | 3.3.15 |
| 2     | 5   | 800  | 0,8333 | 0,0001 | 3.3.16 |
| 6     | 5   | 600  | 0,5    | 0,0001 | 3.3.17 |
| 6     | 3   | 800  | 0,666  | 0,0001 | 3.3.18 |
| s     |     |      |        |        | 3.3.19 |
| 3     |     |      |        |        | 3.3.20 |
| 1     | 2   | 5    |        |        | 3.3.21 |
| 306   | 51  | 400  |        |        | 3.3.22 |
| s     |     |      |        |        | 3.3.23 |
| 1     |     |      |        |        | 3.3.24 |
| 2     | 100 |      |        |        | 3.3.25 |

Tabela 3.3: Arquivo de dados simula1.dat

Apresentando-se os significados de cada linha, na tabela 3.4, tem-se:

|        |  |
|--------|--|
| 3.3.1  | Precisão desejada.   |
| 3.3.2  | Número máximo de iterações.  |
| 3.3.3  | Sistema de unidades adotada - nesse caso, o inglês.                  |
| 3.3.4  | Número de nós da rede.   |
| 3.3.5  | Fluxo externo e cota do nó 1, respectivamente.                       |
| 3.3.6  | Fluxo externo e cota do nó 2, respectivamente.                       |
| 3.3.7  | Fluxo externo e cota do nó 3, respectivamente.                       |
| 3.3.8  | Fluxo externo e cota do nó 4, respectivamente.                       |
| 3.3.9  | Fluxo externo e cota do nó 5, respectivamente.                       |
| 3.3.10 | Fluxo externo e cota do nó 6, respectivamente.                       |
| 3.3.11 | Número total de trechos.   |
| 3.3.12 | Nó origem 1, nó dest. 2, comprim. trecho, diâmetro tubo e rugosidade |
| 3.3.13 | Nó origem 3, nó dest. 2, comprim. trecho, diâmetro tubo e rugosidade |
| 3.3.14 | Nó origem 4, nó dest. 3, comprim. trecho, diâmetro tubo e rugosidade |
| 3.3.15 | Nó origem 1, nó dest. 4, comprim. trecho, diâmetro tubo e rugosidade |
| 3.3.16 | Nó origem 2, nó dest. 5, comprim. trecho, diâmetro tubo e rugosidade |
| 3.3.17 | Nó origem 6, nó dest. 5, comprim. trecho, diâmetro tubo e rugosidade |
| 3.3.18 | Nó origem 6, nó dest. 3, comprim. trecho, diâmetro tubo e rugosidade |
| 3.3.19 | Resposta à pergunta se existem nós com perdas de cargas.             |
| 3.3.20 | Quantidade de nós com perdas de cargas localizadas.                  |
| 3.3.21 | Nós com perdas de cargas localizadas nos nós 1, 2 e 5.               |
| 3.3.22 | Valores das perdas de cargas localizadas nos nós 1, 2 e 5.           |
| 3.3.23 | Resposta à pergunta se existem pressões conhecidas.                  |
| 3.3.24 | Quantidade de nós com pressões conhecidas.                           |
| 3.3.25 | Valor da pressão conhecida no nó 2.                                  |

Tabela 3.4: Significados da tabela 3.3

Ao se solicitar ao programa que realizasse os cálculos relativos ao arquivo de dados da tabela 3.3, obteve-se os seguintes resultados, em tela (figura 3.8) e, posteriormente, no formato de arquivo de saída (tabelas 3.5 e 3.6).

Arquivo de saída: simula1.txt - tabelas 3.5 e 3.6

erro= 0.0726 nome do arquivo de dados:simula1.dat

número de iterações= 15

| tubo | vazão                 | nó origem | nó destino | coef.k | expoente n | p.carga | velocid |
|------|-----------------------|-----------|------------|--------|------------|---------|---------|
|      | (pés <sup>3</sup> /s) |           |            |        |            | (ft)    | (ft/s)  |
| 1    | 1,0334                | 1         | 2          | 0,2775 | 1,8046     | 3,7239  | 2,9679  |
| 2    | 0,6241                | 3         | 2          | 4,0201 | 1,7839     | 0,1553  | 0,7951  |
| 3    | 1,1945                | 4         | 3          | 0,8025 | 1,8021     | 1,4885  | 2,1913  |
| 4    | 3,4223                | 1         | 4          | 1,6453 | 1,8192     | 2,0801  | 4,3597  |
| 5    | 1,6575                | 2         | 5          | 0,5136 | 1,8089     | 3,2273  | 3,0408  |
| 6    | 1,6843                | 6         | 5          | 0,0862 | 1,8241     | 19,5320 | 8,5824  |
| 7    | 2,7714                | 6         | 3          | 0,1716 | 1,8263     | 16,1495 | 7,9595  |

Tabela 3.5: Arquivo de saída simula1.txt

nó de referência: 2

| nó | pressão  | cota     | pressão com cota |
|----|----------|----------|------------------|
|    | (ft)     | (ft)     | (ft)             |
| 1  | 103,7239 | 150,0000 | 93,7239          |
| 2  | 100,0000 | 140,0000 | 100,0000         |
| 3  | 100,1553 | 120,0000 | 120,1553         |
| 4  | 101,6438 | 130,0000 | 111,6438         |
| 5  | 96,7727  | 110,0000 | 126,7727         |
| 6  | 116,3048 | 140,0000 | 116,3048         |

Tabela 3.6: Arquivo de saída (nó de referência 2) simula1.txt

### 3.4.2 Comentários sobre os Resultados

No arquivo de saída, são informados, por linha, os resultados por trechos. Em cada linha, observam-se a vazão calculada, em galões por minuto, para o trecho dessa linha, o nó de origem do fluxo que passa pela tubulação e o nó de destino. É informado o coeficiente  $kk$ , substituído no sistema de equações 3.2 e utilizado na linearização das equações de perda de carga. É informado também o expoente  $n$ , presente na fórmula 2.13, a perda de carga, galões, e a velocidade da água, em pés por segundo, resultados estes no sistema inglês de unidades.

```

Turbo Pascal
número de iterações = 10
erro= 6.0608287864E+00
normax= 2.1909667600E+00
número de iterações = 11
erro= 3.0688463773E+00
normax= 1.1113548690E+00
número de iterações = 12
erro= 1.5517286290E+00
normax= 5.6283588175E-01
número de iterações = 13
erro= 7.8366212145E-01
normax= 2.8464871843E-01
número de iterações = 14
erro= 3.9534589174E-01
normax= 1.4378293295E-01
número de iterações = 15
erro= 1.9925750024E-01
normax= 7.2550053446E-02
erro= 0.1993
número de iterações= 15

tubo  vazao(Q)  or/dest  k  exp (n)  p.carga  velocidade
      (pes/s)
1      1.0334  1 2  0.2775  1.8046  3.7239  2.9679
2      0.6241  3 2  4.0201  1.7839  0.1553  0.7951
3      1.1945  4 3  0.8025  1.8021  1.4885  2.1913
4      3.4223  1 4  1.6453  1.8192  2.0001  4.3597
5      1.6575  2 5  0.5136  1.8009  3.2273  3.0408
6      1.6843  6 5  0.0862  1.8241  19.5320  8.5824
7      2.7714  6 3  0.1716  1.8263  16.1495  7.9595

nó de referencia= 2

nó  pressão  cota  pressão com cota
    (ft)    (ft)    (ft)
1    103.7239  150.0000  93.7239
2    100.0000  140.0000  100.0000
3    100.1553  120.0000  120.1553
4    101.6438  130.0000  111.6438
5     96.7727  110.0000  126.7727
6    116.3048  140.0000  116.3048

quer gravar os resultados ? s/n

```

Figura 3.8: Saída dos resultados na tela primeira simulação.

Segundo Bonato, *et al* (2003, p. 47), a faixa de consumo de água, para usuários de pequeno porte, é estimado pela SANEPAR (Companhia de Saneamento do Paraná) em até  $30 \text{ m}^3/\text{mês}$  ou  $1.059,44 \text{ ft}^3/\text{mês}$ . Como a medida que se apresenta está em galões por minuto, a faixa de consumo para pequenos consumidores fica estimada em 11.414,86 gal/mês, o que poderá exigir uma vazão de 0,2642 gal/minuto. Dos resultados apresentados, pode-se verificar que a vazão, em alguns nós da rede possuem valores elevados, o que pode indicar que os consumidores situados nessa rede correspondem a usuários de porte superior a  $30 \text{ m}^3/\text{mês}$ , ou que existem vazamentos em determinados trechos.

### 3.4.3 Análise por Trecho

No arquivo de dados de entrada, foi especificado como critério de parada o erro de 0,1, e o programa informa erro, na saída dos resultados, que o erro foi de 0,0726, com um total de 15 iterações.

No primeiro trecho, verifica-se vazão de 1,0334 galões/minuto, com nó de origem 1 e destino 2. A perda de carga, de acordo com Lencastre (1972, p. 63), constituída pela

coluna de líquido por unidade de peso escoado calculada é de 3,7239 pés, e a velocidade estimada do fluxo é 2,9679 pés por segundo.

No segundo trecho, verifica-se vazão de 0,6241 gal/minuto, com nó de origem 3 e destino 2. A perda de carga calculada é de 0,1553 pés, e a velocidade estimada do fluxo é 0,7951 pés por segundo.

No terceiro trecho, verifica-se vazão de 1,1945 gal/minuto, com nó de origem 4 e destino 3. A perda de carga calculada é de 1,4885 pés, e a velocidade estimada do fluxo é 2,1913 pés por segundo.

No quarto trecho, verifica-se vazão de 3,4223 gal/minuto, com nó de origem 1 e destino 4. A perda de carga calculada é de 2,0801 pés, e a velocidade estimada do fluxo é 4,3597 pés por segundo.

No quinto trecho, verifica-se vazão de 1,6575 gal/minuto, com nó de origem 2 e destino 5. A perda de carga calculada é de 3,2273 pés, e a velocidade estimada do fluxo é 3,0408 pés por segundo.

No sexto trecho, verifica-se vazão de 1,6843 gal/minuto, com nó de origem 6 e destino 5. A perda de carga calculada é de 19,5320 pés, e a velocidade estimada do fluxo é 8,5824 pés por segundo.

No sétimo trecho, verifica-se vazão de 2,7714 gal/minuto, com nó de origem 6 e destino 3. A perda de carga calculada é de 16,1495 pés, e a velocidade estimada do fluxo é 7,9595 pés por segundo.

Nestas informações, é descrito o nó de referência 2, em que é conhecida uma pressão, 100 pés, que serve de base para os cálculos realizados para as pressões, nos 6 nós da rede e são expressos em cada linha. Os resultados informados, nessas linhas são os seguintes: a pressão, que é calculada sem levar-se em conta a cota ou elevação desse nó, e o valor da pressão, considerando-se a cota.

#### **3.4.4 Segunda Simulação**

Considerando-se uma rede de distribuição de água malhada com três anéis, sendo o segundo deles fictício, ligados por dois trechos consecutivos, conforme a figura 3.9, 14 trechos, 13 nós, e os dados das tabelas 3.7 e 3.8, representados no sistema internacional

de medidas, pretende-se verificar o comportamento do programa e a forma como as informações serão dispostas após o processamento dos dados, para uma rede malhada, ou seja, com os anéis dispostos em formato próximo do retangular, com um dos anéis (segundo anel) disposto no formato de pseudo-anel (conforme subitem 2.2.2, deste trabalho), uma vez que não existem tubulações que fechem a linha poligonal.

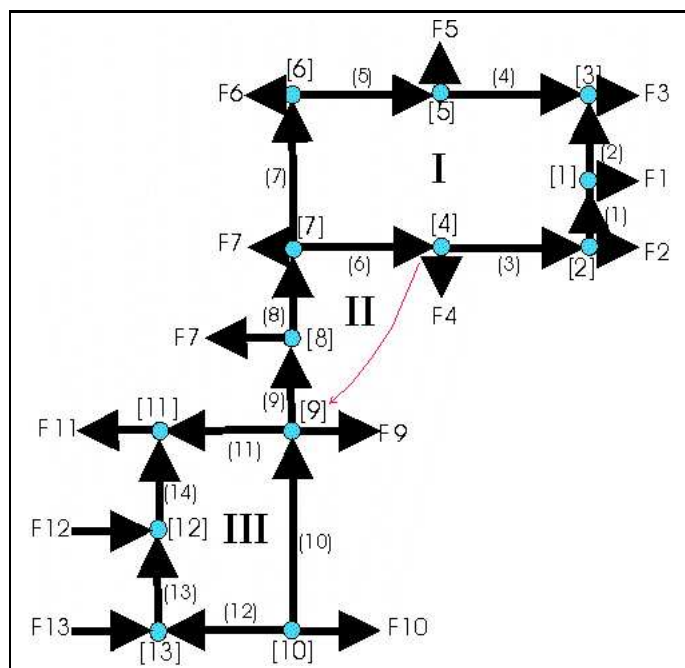


Figura 3.9: Rede malhada 2 para simulação

A tabela 3.9, contém as informações numéricas das tabelas 3.7 e 3.8. Ao lado de cada linha da tabela 3.9 efetivou-se uma referência, no formato 3.9.*i*, com  $i = 1, \dots, 36$ . Os significados dos valores de cada linha correspondente são apresentados na tabela 3.10.

Arquivo de entrada: simula2.dat - tabela 3.9

Apresentando-se os significados de cada linha, tem-se:

A correspondente saída dos resultados, pode ocorrer no formato de arquivo de saída (tabelas 3.11 e 3.12), ou em tela (figura 3.10), e apresenta os resultados relativos aos trechos, anéis e fluxos dessa rede.

Arquivo de saída: simulação2.dat – tabelas 3.11 e 3.12

| Trecho | comprim. | diâmetro | rugosidade | nó origem | nó destino |
|--------|----------|----------|------------|-----------|------------|
|        | (m)      | (mm)     | (cm)       |           |            |
| 1      | 220      | 250      | 0,26       | 2         | 1          |
| 2      | 550      | 150      | 0,26       | 1         | 3          |
| 3      | 420      | 250      | 0,26       | 4         | 2          |
| 4      | 400      | 150      | 0,26       | 5         | 3          |
| 5      | 450      | 150      | 0,26       | 6         | 5          |
| 6      | 660      | 250      | 0,26       | 7         | 4          |
| 7      | 300      | 200      | 0,26       | 7         | 6          |
| 8      | 350      | 300      | 0,26       | 8         | 7          |
| 9      | 250      | 300      | 0,26       | 9         | 8          |
| 10     | 420      | 300      | 0,26       | 10        | 9          |
| 11     | 340      | 350      | 0,26       | 9         | 11         |
| 12     | 290      | 450      | 0,26       | 10        | 13         |
| 13     | 190      | 250      | 0,26       | 13        | 12         |
| 14     | 370      | 350      | 0,26       | 12        | 11         |

Tabela 3.7: Informações simuladas - informações dos trechos

| nó | fluxo ext. | cota | nó | fluxo ext. | cota |
|----|------------|------|----|------------|------|
| 1  | -11        | 901  | 8  | -6         | 930  |
| 2  | -15        | 903  | 9  | -5         | 940  |
| 3  | -10        | 910  | 10 | -188,120   | 951  |
| 4  | -9         | 915  | 11 | -61,790    | 945  |
| 5  | -6.500     | 920  | 12 | 28,670     | 960  |
| 6  | -4         | 913  | 13 | 293,880    | 985  |
| 7  | -6         | 922  |    |            |      |

Tabela 3.8: Informações simuladas - fluxos dos nós

nó de referência: 1

### 3.4.5 Comentários da Segunda Simulação

Os resultados obtidos através do arquivo de dados, expostos nas tabelas 3.7 e 3.8, possuem interpretação análoga ao que se realizou nos subitens 3.4.2 e 3.4.3, deste capítulo. O cuidado adicional está relacionado aos resultados obtidos para o trecho criado para o segundo nó que, por ser fictício, deve ser desprezado.



|          |     |     |     |      |        |
|----------|-----|-----|-----|------|--------|
| 0.1      |     |     |     |      | 3.9.1  |
| 50       |     |     |     |      | 3.9.2  |
| 1        |     |     |     |      | 3.9.3  |
| 13       |     |     |     |      | 3.9.4  |
| -11      | 901 |     |     |      | 3.9.5  |
| -15      | 903 |     |     |      | 3.9.6  |
| -10      | 910 |     |     |      | 3.9.7  |
| -9       | 915 |     |     |      | 3.9.8  |
| -6.500   | 920 |     |     |      | 3.9.9  |
| -4       | 913 |     |     |      | 3.9.10 |
| -6       | 922 |     |     |      | 3.9.11 |
| -6       | 930 |     |     |      | 3.9.12 |
| -5       | 940 |     |     |      | 3.9.13 |
| -188,126 | 951 |     |     |      | 3.9.14 |
| -61,790  | 945 |     |     |      | 3.9.15 |
| 28,670   | 960 |     |     |      | 3.9.16 |
| 293,880  | 985 |     |     |      | 3.9.17 |
| 14       |     |     |     |      | 3.9.18 |
| 2        | 1   | 220 | 250 | 0,26 | 3.9.19 |
| 1        | 3   | 550 | 150 | 0,26 | 3.9.20 |
| 4        | 2   | 420 | 250 | 0,26 | 3.9.21 |
| 5        | 3   | 400 | 150 | 0,26 | 3.9.22 |
| 6        | 5   | 450 | 150 | 0,26 | 3.9.23 |
| 7        | 4   | 660 | 250 | 0,26 | 3.9.24 |
| 7        | 6   | 300 | 200 | 0,26 | 3.9.25 |
| 8        | 7   | 350 | 300 | 0,26 | 3.9.26 |
| 9        | 8   | 250 | 300 | 0,26 | 3.9.27 |
| 10       | 9   | 420 | 300 | 0,26 | 3.9.28 |
| 9        | 11  | 340 | 350 | 0,26 | 3.9.29 |
| 10       | 13  | 290 | 450 | 0,26 | 3.9.30 |
| 13       | 12  | 190 | 250 | 0,26 | 3.9.31 |
| 12       | 11  | 370 | 350 | 0,26 | 3.9.32 |
| n        |     |     |     |      | 3.9.33 |
| s        |     |     |     |      | 3.9.34 |
| 1        |     |     |     |      | 3.9.35 |
| 1        | 100 |     |     |      | 3.9.36 |

Tabela 3.9: Arquivo de dados simula2.dat

|        |   |
|--------|---|
| 3.9.1  | Precisão desejada.  |
| 3.9.2  | Número máximo de iterações.   |
| 3.9.3  | Sistema de unidades adotada - nesse caso, o Internacional.              |
| 3.9.4  | Número de nós da rede.  |
| 3.9.5  | Fluxo externo e cota do nó 1, respectivamente.                          |
| 3.9.6  | Fluxo externo e cota do nó 2, respectivamente.                          |
| 3.9.7  | Fluxo externo e cota do nó 3, respectivamente.                          |
| 3.9.8  | Fluxo externo e cota do nó 4, respectivamente.                          |
| 3.9.9  | Fluxo externo e cota do nó 5, respectivamente.                          |
| 3.9.10 | Fluxo externo e cota do nó 6, respectivamente.                          |
| 3.9.11 | Fluxo externo e cota do nó 7, respectivamente.                          |
| 3.9.12 | Fluxo externo e cota do nó 8, respectivamente.                          |
| 3.9.13 | Fluxo externo e cota do nó 9, respectivamente.                          |
| 3.9.14 | Fluxo externo e cota do nó 10, respectivamente.                         |
| 3.9.15 | Fluxo externo e cota do nó 11, respectivamente.                         |
| 3.9.16 | Fluxo externo e cota do nó 12, respectivamente.                         |
| 3.9.17 | Fluxo externo e cota do nó 13, respectivamente.                         |
| 3.9.18 | Número total de trechos.  |
| 3.9.19 | Nó origem 2, nó destino 1, comprim., trecho, diâmetro tubo e rugosid.   |
| 3.9.20 | Nó origem 1, nó destino 3, comprim., trecho, diâmetro tubo e rugosid.   |
| 3.9.21 | Nó origem 4, nó destino 2, comprim., trecho, diâmetro tubo e rugosid.   |
| 3.9.22 | Nó origem 5, nó destino 3, comprim., trecho, diâmetro tubo e rugosid.   |
| 3.9.23 | Nó origem 6, nó destino 5, comprim., trecho, diâmetro tubo e rugosid.   |
| 3.9.24 | Nó origem 7, nó destino 4, comprim., trecho, diâmetro tubo e rugosid.   |
| 3.9.25 | Nó origem 7, nó destino 6, comprim., trecho, diâmetro tubo e rugosid.   |
| 3.9.26 | Nó origem 8, nó destino 7, comprim., trecho, diâmetro tubo e rugosid.   |
| 3.9.27 | Nó origem 9, nó destino 8, comprim., trecho, diâmetro tubo e rugosid.   |
| 3.9.28 | Nó origem 10, nó destino 9, comprim., trecho, diâmetro tubo e rugosid.  |
| 3.9.29 | Nó origem 9, nó destino 11, comprim., trecho, diâmetro tubo e rugosid.  |
| 3.9.30 | Nó origem 10, nó destino 13, comprim., trecho, diâmetro tubo e rugosid. |
| 3.9.31 | Nó origem 13, nó destino 12, comprim., trecho, diâmetro tubo e rugosid. |
| 3.9.32 | Nó origem 12, nó destino 11, comprim., trecho, diâmetro tubo e rugosid. |
| 3.9.33 | Resposta à pergunta se existem nós com perdas de cargas.                |
| 3.9.34 | Resposta à pergunta se existem pressões conhecidas.                     |
| 3.9.35 | Quantidade de nós com pressões conhecidas.                              |
| 3.9.36 | Valor da pressão conhecida no nó 1.                                     |

Tabela 3.10: Significados da tabela 3.9

```

Turbo Pascal
normax= 1.4666732826E-01
número de iterações = 14
erro= 5.5784023259E-01
normax= 7.5753640100E-02
erro= 0.5578
número de iterações= 14

tubo  vazao<Q>  nó  or/dest  k  exp<n>  p.carga  velocidade
      <l/s>      <n>      <n>      <n/s>
1      15.1257  2  1  0.0905  1.9786  0.1672  0.3083
2      3.9926  1  3  0.0088  1.9714  0.4526  0.2260
3     30.1245  4  2  0.0243  2.0000  1.2380  0.6140
4      6.0066  5  3  0.0081  1.9804  0.7377  0.3401
5     12.5061  6  5  0.0035  2.0000  3.5257  0.7080
6     39.1238  7  4  0.0119  2.0000  3.2811  0.7974
7     16.5058  7  6  0.0189  2.0000  0.8754  0.5256
8     61.6291  8  7  0.0378  2.0000  1.6324  0.8723
9     67.6286  9  8  0.0482  2.0000  1.4040  0.9572
10    48.9812  10  9  0.0396  2.0000  1.2373  0.6932
11    23.6471  11  9  0.2240  1.9738  0.1080  0.2459
12   237.0923  13  10  0.1024  2.0000  2.3333  1.4914
13    56.7644  13  12  0.0286  2.0000  1.9885  1.1569
14    85.4322  12  11  0.0586  2.0000  1.4591  0.8884

nó de referencia= 1

nó  pressão  cota  pressão com cota
   <n>      <n>      <n>
1    100.0049  901.0000  100.0049
2    100.1720  903.0000  98.1720
3     99.5523  910.0000  90.5523
4    101.4100  915.0000  87.4100
5    100.2900  920.0000  81.2900
6    103.8158  913.0000  91.8158
7    104.6911  922.0000  83.6911
8    106.3235  930.0000  77.3235
9    107.7275  940.0000  68.7275
10   108.9649  951.0000  58.9649
11   107.8331  945.0000  63.8331
12   109.2922  960.0000  50.2922
13   111.2807  985.0000  27.2807

quer gravar os resultados ? s/n

```

Figura 3.10: Saída dos resultados na tela segunda simulação.

| tubo | vazão                 | nó origem | nó destino | coef. k | exp <i>n</i> | p.carga | veloc. |
|------|-----------------------|-----------|------------|---------|--------------|---------|--------|
|      | (pés <sup>3</sup> /s) |           |            |         |              | (m)     | (m/s)  |
| 1    | 15,1257               | 2         | 1          | 0,0905  | 1,9786       | 0,1672  | 0,3083 |
| 2    | 3,9926                | 1         | 3          | 0,0088  | 1,9714       | 0,4526  | 0,2260 |
| 3    | 30,1245               | 4         | 2          | 0,0243  | 2,0000       | 1,2380  | 0,6140 |
| 4    | 6,0066                | 5         | 3          | 0,0081  | 1,9804       | 0,7377  | 0,3401 |
| 5    | 12,5061               | 6         | 5          | 0,0035  | 2,0000       | 3,5257  | 0,7080 |
| 6    | 39,1238               | 7         | 4          | 0,0119  | 2,0000       | 3,2811  | 0,7974 |
| 7    | 16,5058               | 7         | 6          | 0,0189  | 2,0000       | 0,8754  | 0,5256 |
| 8    | 61,6291               | 8         | 7          | 0,0378  | 2,0000       | 1,6324  | 0,8723 |
| 9    | 67,6286               | 9         | 8          | 0,0482  | 2,0000       | 1,4040  | 0,9572 |
| 10   | 48,9812               | 10        | 9          | 0,0396  | 2,0000       | 1,2373  | 0,6932 |
| 11   | 23,6471               | 11        | 9          | 0,2240  | 1,9738       | 0,1080  | 0,2459 |
| 12   | 237,0923              | 13        | 10         | 0,1024  | 2,0000       | 2,3333  | 1,4914 |
| 13   | 56,7644               | 13        | 12         | 0,0286  | 2,0000       | 1,9885  | 1,1569 |
| 14   | 85,4322               | 12        | 11         | 0,0586  | 2,0000       | 1,4591  | 0,8884 |

Tabela 3.11: Arquivo de saída simula2.txt

Uma das características principais desta simulação realizada, está relacionada aos nós 4, 7, 8 e 9, que interligam os trechos 6, 8 e 9, pois criou-se um trecho fictício interligando os nós 4 e 9, dando origem ao segundo anel da rede dessa simulação. Esse procedimento deu-se a fim de completar as equações de continuidade para resolução pos-

| nó | pressão  | cota     | pressão com cota |
|----|----------|----------|------------------|
| 1  | 100,0049 | 901,0000 | 100,0049         |
| 2  | 100,1720 | 903,0000 | 98,1720          |
| 3  | 99,5523  | 910,0000 | 90,5523          |
| 4  | 101,4100 | 915,0000 | 87,4100          |
| 5  | 100,2900 | 920,0000 | 81,2900          |
| 6  | 103,8158 | 913,0000 | 91,8158          |
| 7  | 104,6911 | 922,0000 | 83,6911          |
| 8  | 106,3235 | 930,0000 | 77,3235          |
| 9  | 107,7275 | 940,0000 | 68,7275          |
| 10 | 108,9649 | 951,0000 | 58,9649          |
| 11 | 107,8331 | 945,0000 | 63,8331          |
| 12 | 109,2922 | 960,0000 | 50,2922          |
| 13 | 111,2807 | 985,0000 | 27,2807          |

Tabela 3.12: Arquivo de saída (nó de referência 1) simula2.txt

terior do sistema de equações formado, conforme explanado no item 3.2.1.

Os resultados obtidos para o trecho criado para a formação do segundo anel, por ser fictício, serão desprezados, devido a inexistência do trecho.

# Capítulo 4

## Conclusões e Sugestões

### 4.1 Conclusões

Ao se realizar os estudos inerentes a conceitos da engenharia hidráulica, em que podem ser constatadas variações de pressão e vazão, ao longo de uma rede de distribuição de água, verificou-se a possibilidade de se utilizar fórmulas conhecidas, em hidráulica, para a determinação das vazões existentes nos nós de ligação dos trechos.

Ao se utilizar as formulações desenvolvidas por Hazen e Williams e por Darcy e Weisbach, combinando conceitos de métodos numéricos, pela utilização de equações lineares para as vazões nos trechos e equações linearizadas, para as perdas de carga nos anéis da rede, pode-se apurar que o sistema de equações, oriundo das equações das vazões nos trechos e das perdas de carga nos anéis, podem ser resolvidas seguindo-se o método de Gauss com pivoteamento, para solução do sistema de equações oriundo da construção das equações, numa rede de distribuição de água.

Na linearização das equações de perda de carga, utilizou-se satisfatoriamente o método de Newton-Raphson, obtendo-se os coeficientes, base de cálculo das vazões, necessários para a construção dessas equações.

Conseguiu-se estruturar os modelos matemáticos estudados, através do programa computacional em linguagem de programação pascal, e a adequação dos conceitos hidráulicos a esse programa, de modo que o objetivo inicial de se calcular pressões e vazões cumpriram-se adequadamente.

Ao se buscar informações para alimentação do programa computacional, houve a preocupação de realizar os trabalhos considerando, inicialmente, duas redes com informações simuladas. A primeira rede de distribuição de água (figura 3.7) que foi considerada está configurada como rede malhada, com formato próximo do retangular e foi escolhida como teste inicial, visando verificar a funcionalidade e operacionalidade do programa computacional. A segunda rede de distribuição de água (figura 3.9) possui, entre os nós 4, 7, 8 e 9, uma ligação com ramificação, unindo duas redes malhadas. O teste realizado visou testar o funcionamento do programa em seus correspondentes resultados.

Para a segunda rede, nos nós, pertencentes aos trechos 6, 8 e 9, ao se criar um trecho fictício, unindo os nós 4 e 9, foram obtidos resultados, quando ocorreu o processamento das informações pelo programa, que devem ser desprezadas, pois tal trecho é inexistente.

Comparando-se os resultados apurados, nas duas redes de distribuição simuladas, pode-se observar a influência que grandes elevações tem nos cálculos de pressão, uma vez que a primeira rede (figura 3.7), possuía cotas menores, verificando-se pressões ligeiramente mais altas, se comparadas com os mesmos resultados obtidos na segunda rede (figura 3.9), onde se observam cotas maiores com menores pressões. Uma inferência possível de ser realizada, para esse caso, é a necessidade de implantação de bombas que incrementem as pressões da segunda rede ou, dependendo das necessidades do usuário do programa, válvulas que reduzam as pressões na primeira rede.

Os testes foram realizados com o programa Turbo Pascal 7.0, em um microcomputador PC AMD SEMPRON, 2.8 Giga de memória RAM e 80 Giga de HD. Constatou-se que a velocidade de processamento foi, em todos os casos estudados, de poucos segundos e que o número de iterações, para as duas simulações apresentadas, dentre as muitas realizadas, não excederam a 20.

## **4.2 Sugestões para Trabalhos Futuros**

Com a intenção de aprimorar os estudos iniciados com este trabalho, podem-se fazer as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

a) Realizar o aperfeiçoamento do sistema computacional, com a implantação da possibilidade dos cálculos incluindo bombas, válvulas e boosters, em redes do sistema de

distribuição de água, com a possível efetivação de convênio com empresas de distribuição de água.

b) Adequação do sistema computacional para a possibilidade de utilização, nos cálculos de pressões e vazões, de técnicas de otimização difundidas pelos métodos de programação linear, e melhoria do programa para uma interface gráfica mais amigável.

c) Desenvolvimento de técnicas próprias de simulação das informações e que utilizem princípios estatísticos da análise multivariada, e que possam ser integrados com sistemas CAD.

d) Adequar o programa para estudos de cálculos de pressões e vazões em redes de distribuição de gás, considerando-se suas especificidades químicas, de armazenamento e distribuição, através de métodos numéricos, métodos de otimização da programação linear ou estatísticos.

e) Análise de sistemas de distribuição de água em redes urbanas prediais e adequação do sistema para possibilitar inferências que sejam ajustadas às medições e comprovações empíricas.

# Apêndice A

## Programa Vazão1

```
Program vazao1; { este programa calcula as vazoes e pressoes numa rede
  de distribuicao de agua }
const ll=90; m=90;n=90; maxanel=20; {ll, m e n sao os trechos, maxanel
e o numero maximo de aneis}
type  node= 0..n; vector = array [1..m] of real;
var
  naux1,i,j,k,kl,nj,np,nl,max : integer;
  chave,s,no,naa,nct           : integer;
  NR, ip, su, opcao            : integer;
  epon,aux1,aux2,ct,f,faux,re: real;
  rel,re2,elog                 : real;
  soma,qm,v,vq,v1,v2,ve,f1,f2 : real;
  normax,a1,b1,par,arg,ep      : real;
  nomearq1,nomearq             : string [12];
  tail,head                     : array [0..m] of node;
  Q, KK, QAUX, AR, ARL, EXPP, PC : vector;
  LI, L, D, E, DELTAL          : vector;
  TPCL                          : array [1..m] of integer;
  HI, H, Z, b, fluxoext         : array [1..ll] of real;
  anel                          : array [1..maxanel] of integer;
  labell                        : array [1..maxanel,1..m] of integer;
  A                             : array [1..m,1..n] of real;
  int,out,out1                  : text;
```



```

resp,resp1                                : char;

Procedure Equacont;{Formacao das equacoes das condicoes de continua-
de de cada no}
Var
    arco : integer; {definicao da variavel arco referente aos trechos
    ou tubos (trecho 1, 2, 3,..., np etc)e que assumem valores inteiros}
Begin
    for arco:=1 {tubo 1} to np {tubo np} do
        begin
            A[tail[arco],arco]:=1; {tail=origem }
            A[head[arco],arco]:=-1; {head=destino }
        end;
    for no:=1 to nj-1 do {no 1 ate no "n" menos 1}
        begin
            b[no]:= fluxoext[no]/449;
        end;
    End;
Procedure equaneis;
var      i,j,k : integer;
begin
    for i:=nj to np do
        begin
            b[i]:=0;
            for j:=1 to np do
                a[i,j]:=0;
            end;
            i:=1;          { numeracao do anel }
            j:=nj;         {ordem das equacoes }
            repeat
                for k:=1 to anel[i] do
                    begin
                        if labell[i,k]>0 then
                            a[j,labell[i,k]]:=kk[labell[i,k]]
                        else
                            begin
                                s:=abs(labell[i,k]);
                                a[j,s]:=-kk[s];
                            end;
                    end;
                end;
            until i=nj;
        end;
    end;

```

```

        end;
        i:=i+1;
        j:=j+1;
    until j>np;
end;

Procedure newton (var funcao : real);
var
    ct : integer;
    fs,fz,arg,ff,df,dif,aux : real;
begin
    ct:=0; dif:=100;
    while (dif>0.00001) and (ct<15) do
        begin
            fs:=sqrt(funcao);
            fz:=0.5/(funcao * sqrt(funcao));
            arg:=e[i]+9.35/(re * fs);
            aux:=ln(arg)/ln(10);
            ff:=(1/sqrt(funcao))-1.14+2 * aux;
            df:=fz+((elog * fz)/(arg * re));
            dif:=ff/df;
            funcao:=funcao+dif;
            ct:=ct+1;
        end;
    end;

Procedure gauss ( n:integer; var x:vector);
var
    i,j,k : integer;
    m,s,aux,max : real;
begin
    {eliminacao}
    for k:=1 to n-1 do
        begin
            max:=a[k,k]; j:=k;
            for i:=k+1 to n do
                begin
                    if abs(a[i,k])>abs(max) then
                        begin
                            max:=a[i,k];
                            j:=i;

```

```

end;

end;
if j<>k then
begin
for i:=k to n do
begin
aux:=a[k,i];
a[k,i]:=a[j,i];
a[j,i]:=aux;
end;
aux:=b[k];
b[k]:=b[j];
b[j]:=aux;
end
else
if max=0 then writeln('matriz singular');
for i:=k+1 to n do
begin
m:=a[i,k]/a[k,k];
a[i,k]:=0;
for j:=k+1 to n do
a[i,j]:=a[i,j]-m * a[k,j];
b[i]:=b[i]-m * b[k];
end;
end;

{ Retrosubstituicao }
x[n]:=b[n]/a[n,n];
for i:=n-1 downto 1 do
begin
s:=0;
for j:=i+1 to n do
s:=s+a[i,j] * x[j];
{ writeln('mostre s: ', s);}
x[i:=(b[i]-s)/a[i,i];
{ writeln('mostre x[i]: ',x[i]);}
end;
end;

```

Procedure CriaArq;

```

begin
  Clrscr; {apaga a tela}
  gotoxy (30,10);
  writeln ('NOME DO ARQUIVO ? ');
  gotoxy (33,13);
  readln (NomeArq);
  assign (out,NomeArq);
  rewrite (out);
  writeln ('Entre com a Precisao e o Numero Maximo de Iteracoes:');
  readln (epson,max);
  writeln (out,epson,' ',max);
  writeln ('Entre c/codigo do sist.unid.: 1 (sist. intern.) ou 2(sist
ingles)');
  readln (su);
  writeln (out,su);
  writeln ('Entre com a quantidade de Nos');
  readln (nj);
  writeln (out,nj);
  writeln ('Entre com o fluxo externo e com a cota em cada no');
  for i:=1 to nj do
  begin
    writeln ('Fluxo e Cota do No', i:3);
    readln (fluxoext[i],Z[i]);
    writeln (out,fluxoext[i],Z[i]);
  end;
  writeln ('Entre com a quantidade de Trechos');
  readln (np);
  writeln (out,np);
  writeln ('Entre com as especificacoes de cada trecho:');
  writeln ('origem-destino-comprimento-diametro-rugosidade');
  for j:=1 to np do
  begin
    writeln('trecho',j:3);
    read (tail[j],head[j],LI[j],D[j],E[j]);
    write (out,tail[j],' ',head[j],LI[j],D[j],E[j]);
    writeln (out);
    writeln;
  end;
  {PERDAS DE CARGAS LOCALIZADAS}

```

```

writeln('Existem perdas de cargas localizadas? s/n ');
readln(respl);
writeln(out,respl);
if(respl = 's' ) or (respl = 'S' ) then
begin
    writeln ('Em quantos trechos?');
    readln(k);
    writeln(out,k);
    writeln('entre com os trechos e os comprimentos
equivalentes:');

    for i:=1 to k do
    begin
        writeln ('trecho e comprimento equivalente');
        readln (tpcl[i],deltal[tpcl[i]]);
        end;
    for i:=1 to k do
    write (out,tpcl[i],' ');
    writeln (out);
    for i:=1 to k do
    begin
        write (out,deltal[tpcl[i]]);
        end;
    WRITELN (OUT);
    writeln;
end;

writeln('Exitem pressoes conhecidas? s/n ');
readln (resp);
writeln (out,resp);
if (resp = 's') or (resp = 'S') then
begin
    writeln ('Em quantos nos? ');
    readln(k);
    writeln (out,k);
    writeln ('entre com os Nos e as Pressoes:');
    for i:=1 to k do
    begin
        WRITELN ('No e Pressao');
        readln (ip,HI[ip]);
    end;
end;

```

```

        writeln (out,ip,HI[ip]);
    end;
    nr:=ip;
end;

writeln ('Entre com a quantidade de aneis ');
readln (nl);
writeln (out,nl);
for i:=1 to nl do
begin
    writeln ('Entre com a quantidade de TRECHOS do anel:',i:3);
    read (anel[i]);
    write (out,anel[i], ' ');
    writeln;
    writeln ('Entre com os TRECHOS do anel ',i:3);
    for j:=1 to anel[i] do
        begin
            writeln ('trecho:');
            readln (labell[i,j]);
        end;
        for j:=1 to anel[i] do
            write (out,labell[i,j], ' ');
        writeln (out);
    end;
{ writeln;
    writeln ('Entre com a precisao');
    readln (epson);
    writeln (out,epson);
    writeln ('entre com o numero maximo de iteracoes');
    readln (max);
    writeln (out,max); }
    close (out);
end;

Procedure Lerarq;
begin
    clrscr;
    gotoxy (30,10);
    writeln ('NOME DO ARQUIVO ?');
    gotoxy (33,13);
    readln (NomeArq);

```

```

assign (int,Nomearq);
reset (int);
readln (int,epson,max);
readln (int,su);
readln (int,nj);
for i:=1 to nj do
    readln (int,fluxoext[i],Z[i]);
readln (int,np);
for j:=1 to np do
readln (int,tail[j],head[j],LI[j],D[j],E[j]);
                                {PERDAS DE CARGAS LOCALIZADAS}
readln(int,respl);
if (respl='s') or (respl='S') then
    begin
        readln (int,k);
        FOR i:=1 to K do
            BEGIN
                read(int,tpcl[I]);
                END;
            for i:=1 to k do
                begin
                    read (int,deltal[tpcl[i]]);
                    end;
                readln (int);
            end;
        readln (int,resp);
        if (resp='s') or (resp='S') then
            BEGIN
                readln (int,k1);
                for i:=1 to k1 do
                    begin
                        readln (int,ip,HI[ip]);
                        end;
                    nr:=ip;
            END;
        read (int,nl);
        for i:=1 to nl do
            begin
                read (int);

```

```

        read (int,anel[i]);
        for j:=1 to anel[i] do
            read (int,label1[i,j]);
        end;
    { read (int);
      readln (int,epson);
      readln (int,max);}
    close (int);
end;

procedure saidarq;
begin
    writeln('Entre com o nome do arquivo:');
    readln(nomearq1);
    assign(out1,nomearq1);
    rewrite(out1);
    writeln(out1,'erro=',normax:7:4,' nome do arquivo de dados=',nomearq);
    writeln(out1, 'numero de iteracoes=',nct:3);
        writeln(out1,'                                no ');
    writeln(out1,'tubo ',' vazao ',' origem/destino ',' k ','
    ' expp ',' p.carga ',' veloc. ');
    if su=1 then
        writeln(out1,' (l/s) (m) (m/s) ');
    else
        writeln(out1,' (pes3/s) ) (ft/s) ');
    for i:=1 to np do
        writeln(out1,i:3,qaux[i]:10:4,tail[i]:6,head[i]:6,kk[i]:12:4,expp[i]:
        11:4,pc[i]:11:4,q[i]:11:4);
        writeln(out1);
        writeln(out1,' no de referencia= ',nr);
        writeln(out1);
        writeln(out1,' no ',' pressao ',' cota ',' pressao com cota ');
        if su=1 then
            writeln(out1,' (m) (m) (m) ');
        else
            writeln(out1,' (ft) (ft) (ft) ');
        for i:=1 to nj do
            {*****}
            writeln(out1,i:3,H[i]:12:4,Z[i]:12:4,hi[i]:15:4);

```



```

close(out1);
end;

{ PROGRAMA PRINCIPAL }
begin
  chave:=1;
  ip:=0;
  for i:=1 to m do
    begin
      tail[i]:=0;
      head[i]:=0;
      L[i]:=0;
      LI[i]:=0;
      DELTAL[i]:=0;
      E[i]:=0;
      D[i]:=0;
      Q[i]:=0;
      KK[i]:=0;
      EXPP[i]:=0;
      PC[i]:=0;
    end;
  for i:=1 to m do
    begin
      for j:=1 to m do
        A[i,j]:=0;
      end;
    end;
  for i:=1 to ll do
    begin
      fluxoext[i]:=0;
      H[i]:=0;
      HI[i]:=0;
    end;
  for i:=1 to maxanel do
    begin
      for j:=1 to m do
        labell[i,j]:=0;
      end;
      anel[i]:=0;
    end;
  clrscr;

```

```

gotoxy (30,10);
writeln ('ESCOLHA SUA OPCA0');
gotoxy (32,12);
writeln (' 0 = CRIAR ARQUIVO ');
gotoxy (32,14);
writeln (' 1 = LER ARQUIVO ');
gotoxy (38,16);
readln (OPCA0);
if opcao = 1 then
    lerarq
else
    criaarq;
for i:=1 to np do
L[i]:=LI[i]+DELTAL[i];
{writeln('mostre L[i]: ', l[i]);}
if(su=1) then
    begin
        for i:=1 to nj do
            begin
                fluxoext[i]:= 15.85*fluxoext[i];
writeln('mostre fluxoext : ', fluxoext[i]);
            end;
        for i:=1 to np do
            begin
                l[i]:=3.281*l[i];
                writeln('mostre l[i]: ',l[i]);
                d[i]:=0.0033*d[i];
                { e[i]:=0.039*e[i];}
                e[i]:=0.3937*e[i];
            end;
        end;
for i:=1 to np do
    begin
        e[i]:=e[i]/(12*d[i]);
        { writeln('mostre e[i] ',e[i]);}
        AR[i]:= (3.14 * (D[i] * D[i]))/4;
        { writeln('mostre ar[i] ',ar[i]);}
        ARL[i]:=L[i]/(64.4 * D[i] * AR[i] * AR[i]);
        { writeln('mostre arl[i] ',arl[i]);}
    
```

```

    aux1:=exp(4.87 * ln(D[i]));
{   writeln('mostre aux1 ',aux1);}
    KK[i]:=0.0009517 * (L[I]/aux1);
{   writeln('mostre kk[i] ',kk[i]);}
end;
elog:=18.7/ln(10);
{ writeln('mostre elog : ', elog);}
soma:=100;
normax:=100;
nct:=0;
v:= 0.00001217;
repeat
    for i:=1 to m do
        begin
            for j:=1 to m do
                a[i,j]:=0;
            end;
        equacont;
        equaneis;
        gauss (np,Q);
        if nct>0 then
            begin
                soma:=0;
                normax:=0;
            end;
        for i:=1 to np do
            begin
                if nct <=0 then qm:=q[i]
                else
                    begin
                        qm:=0.5 * (qaux[i]+q[i]);
                        soma:=soma+abs(qaux[i]-qm);
                        if(abs(qaux[i]-qm)>normax) then
                            normax:=abs(qaux[i]-qm);
                    end;
                qaux[i]:=qm;
                vq:=0.1 * qm;
                qm:=abs(qm);
                v1:=(qm-vq)/ar[i];
            end;
        end;
    end;

```

```

    if v1<=0.001 then v1:=0.002;
v2:=(qm+vq)/ar[i];
    if v2<=0.001 then v2:=0.002;
ve:=qm/ar[i];
rel:=(v1 * d[i])/V;
re2:=(v2 * d[i])/v;
    if re2 <= 2100 then
        begin
            f1:=64/re1;
            f2:=64/re2;
            exp[i]:=1;
            kk[i]:=(64.4 * v * arl[i])/d[i];
        end
    else
        begin
            aux1:= Ln(e[i])/Ln(10);
            f:=1/((1.14-2 * aux1) * (1.14-2 * aux1));
            faux:=f;
            par:=(ve * sqrt(0.125*f) * d[i] * e[i])/v;
            if par > 65 then
                begin
                    kk[i]:=f * arl[i] * qm;
                    exp[i]:=2;
                end
            else
                begin
                    re:=rel;
                    newton(faux);
                    f1:=faux;
                    re:=re2;
                    newton(f);
                    f2:=f;
                    b1:=(ln(f1)-ln(f2))/(ln(qm+vq)-ln(qm-vq));
                    aux1:=exp(b1 * ln(qm-vq));
                    a1:=f1 * aux1;
                    ep:=1-b1;
                    exp[i]:=ep+1;
                    aux1:=exp(ep * ln(qm));
                    kk[i]:=a1 * arl[i]* aux1;
                end
            end
        end
    end

```

```

end;

end;

end;

{CRITERIO DE PARADA}

nct:=nct+1;
writeln ('NUMERO DE ITERAÇÕES = ',NCT:3);
for i:=1 to np do
until ((soma<=epson) or (nct>=max) or (normax<=epson));
writeln('erro=',soma:7:4);
writeln('normax= ',normax:7:4);
writeln('numero de iteracoes=',nct:3);
        writeln('                no                ');
writeln('Trecho ', 'vazao ', ' origem/destino ', ' k ', ' exp', ' p.
carga ', ' veloc');
    if su=1 then
        writeln('                (l/s)                (m)                (m/s)');
    else
        writeln('                (pes3/s)                (ft)                (ft/s)');
    for i:=1 to np do
    begin
    if (qaux[i]<0) then
        begin
        naux1:=tail[i];
        tail[i]:=head[i];
        head[i]:=naux1;
        qaux[i]:=abs(qaux[i]);
        end;

{***** perda de carga *****)
if qaux[i]=0 then
pc[i]:=0
else
pc[i]:=kk[i]*qaux[i];
{***** velocidades *****)
if qaux[i]=0 then
q[i]:=0
else
q[i]:=qaux[i]/ar[i];
{*****}

```

```

        if su=1 then
        begin
        qaux[i]:=qaux[i]*28.33;
        kk[i]:=kk[i]*10.764;
        aux2:=pc[i]*0.305;
        pc[i]:=kk[i]*(qaux[i]/1000);
        q[i]:=q[i]*0.3048;
        end;
writeln(i:3,qaux[i]:10:4,tail[i]:6,head[i]:6,kk[i]:12:4,expp[i]:11:4,
pc[i]:11:4,q[i]:11:4);
        if nct=max then
                writeln ('nao convergiu em', max:5, 'iteracoes');
        end;
        writeln;
if ip<>0 then
begin
{*****}
{CALCULO DAS PRESSOES NOS NOS}
{*****}

while chave=1 do
begin
        writeln('no de referencia= ',nr);
        writeln;
        writeln(' no ',' pressao ',' cota ',' pressao c/cota');
        if su=1 then
        begin
                writeln(' (m) (m) (m) ');
        end
        else
                writeln (' (ft) (ft) (ft)');
for i:=1 to nj do
        H[i]:=0;
        H[nr]:=HI[nr];
        for j:=ip to nj do
        begin
                for i:=1 to np do
                begin
                        aux1:=abs(qaux[i]);

```

```

if (aux1>0.00001) AND (l[i]<30000) then
begin
  if(tail[i]=j) then
  begin
    if(H[tail[i]]<>0) and (h[head[i]]=0) then
      H[head[i]]:=H[tail[i]]-pc[i];
    if(H[tail[i]]=0) and (H[head[i]]<>0) then
      H[tail[i]]:=H[head[i]]+pc[i];
  end;
  if(head[i]=j) then
  begin
    if(H[head[i]]<>0) and (H[tail[i]]=0) then
      H[tail[i]]:=H[head[i]]+pc[i];
    if(H[head[i]]=0) and (H[tail[i]]<>0) then
      H[head[i]]:=H[tail[i]]-pc[i];
  end;
end;
end;

for j:= nj downto 1 do
begin
  for i:=1 to np do
  begin
    aux1:=abs(qaux[i]);
    if (aux1>0.00001) AND (l[i]<30000) then
    begin
      if(tail[i]=j) then
      begin
        if(H[tail[i]]<>0) and (H[head[i]]=0) then
          H[head[i]]:=H[tail[i]]-pc[i];
        if(H[tail[i]]=0) and (H[head[i]]<>0) then
          H[tail[i]]:=H[head[i]]+pc[i];
      end;
      if (head[i]=j) then
      begin
        if(H[head[i]]<>0) and (H[tail[i]]=0) then
          H[tail[i]]:=H[head[i]]+pc[i];
        if(H[head[i]]=0) and (H[tail[i]]<>0) then

```

```

        H[head[i]]:=H[tail[i]]-pc[i];
    end;
end;
end;
end;
for j:= 1 to nj do
begin
    for i:=1 to np do
    begin
        aux1:=abs(qaux[i]);
        if (aux1>0.00001) AND (l[i]<30000) then
        begin
            if(tail[i]=j) then
            begin
                if(H[tail[i]]<>0) and (H[head[i]]=0) then
                H[head[i]]:=H[tail[i]]-pc[i];
                if(H[tail[i]]=0) and (H[head[i]]<>0) then
                H[tail[i]]:=H[head[i]]+pc[i];
            end;
            if (head[i]=j) then
            begin
                if(H[head[i]]<>0) and (H[tail[i]]=0) then
                H[tail[i]]:=H[head[i]]+pc[i];
                if(H[head[i]]=0) and (H[tail[i]]<>0) then
                H[head[i]]:=H[tail[i]]-pc[i];
            end;
        end;
    end;
end;
end;

{*****}
{Calculo da pressão da cota}
{*****}
for J:=1 to nj do
begin
    hi[j]:=h[j];
    for i:=1 to np do
    begin
        if(qaux[i]>0.00001) and (l[i]<30000) then

```



```

        if (hi[tail[i]]<>h[tail[i]]) and (hi[head[i]]=h[head[i]])then
            hi[head[i]]:=hi[head[i]]-(z[head[i]]-z[nr])
        else
            if (hi[tail[i]]=h[tail[i]]) and (hi[head[i]]<>h[head[i]])then
                hi[tail[i]]:= hi[tail[i]]-(z[tail[i]]-z[nr]);
            end;
        end;
    end;
for j:=nj downto 1 do
    begin
        for i:=1 to np do
            if(qaux[i]>0.00001) and (l[i]<30000) then
                if (hi[tail[i]]<>h[tail[i]]) and (hi[head[i]]=h[head[i]]) then
                    hi[head[i]]:=hi[head[i]]-(z[head[i]]-z[nr])
                else
                    if (hi[tail[i]]=h[tail[i]]) and (hi[head[i]]<>h[head[i]]) then
                        hi[tail[i]]:= hi[tail[i]]-(z[tail[i]]-z[nr]);
                    end;
                end;
            end;

        for i:=1 to nj do
            {*****}
            writeln(i:3,H[i]:12:4,Z[i]:12:4,hi[i]:15:4);
            writeln('quer gravar os resultados ? s/n ');
            readln(resp);
            if(resp=' s ') or (resp='S') then saidarq;
        write(' quer testar outro no de referênciã? (0=não, 1= sim) ');
        readln(chave);
        if (chave=1) then
            begin
                write('no de referencia= ');
                readln(nr);
                write('pressao = ');
                readln(H[nr]);
                if su=1 then
                    begin
                        for i:=1 to nj do
                            begin
                                qaux[i]:=qaux[i]/28.33;
                                kk[i]:=kk[i]/10.764;
                                pc[i]:=kk[i]*qaux[i]*1000;

```

```

        HI[i]:=0;
    end;
    HI[nr]:=3.281*H[nr];
end
else
begin
    for i:=1 to nj do
        HI[i]:=0;
        HI[nr]:=H[nr];
    end;
end;
end;
end;

end.

```

# Apêndice B

## Fórmula Práticas

| Fórmulas práticas    |       |                   |                |
|----------------------|-------|-------------------|----------------|
| Ordem                | Ano   | Autor             | País           |
| 1                    | 1775  | Chézy             | França         |
| 2                    | 1779  | Dubuat            | França         |
| 3                    | 1791  | Woltmann          | Alemanha       |
| 4                    | 1796  | Eytelwein         | Alemanha       |
| 5                    | 1800  | Coulomb           | França         |
| 6                    | 1802  | Eisenmann         | Alemanha       |
| 7                    | 1804  | Prony             | França         |
| 8                    | 1825  | D'Aubuisson       | França         |
| 9                    | 1828  | Tadini            | Itália         |
| 10                   | 1845  | Weisbach          | Alemanha       |
| 11                   | 1851  | Saint Venant      | França         |
| 12                   | 1854  | Hagen             | Alemanha       |
| 13                   | 1855  | Dupuit            | França         |
| 14                   | 1855  | Leslie            | Inglaterra     |
| 15                   | 1857  | Darcy             | França         |
| 16                   | 1867  | Ganguillet-Kutter | Suíça          |
| 17                   | 1867  | Levy              | França         |
| 18                   | 1868  | Bresse            | França         |
| 19                   | 1868  | Gauckler          | França         |
| 20                   | 1873  | Lampe             | Alemanha       |
| 21                   | 1877  | Fanning           | Estados Unidos |
| 22                   | 1877  | Hamilton Smith    | Estados Unidos |
| 23                   | 1878  | Colombo           | França         |
| 24                   | 1878  | Darrach           | Estados Unidos |
| 25                   | 1880  | Ehrmann           | Alemanha       |
| 26                   | 1880  | Iben              | Alemanha       |
| 27                   | 1881  | Franck            | Alemanha       |
| 28                   | 1883  | Reynolds          | Inglaterra     |
| 29                   | 1884  | Thrupp            | Inglaterra     |
| 30                   | 1886  | Unwin             | Estados Unidos |
| 31                   | 1887  | Stearns-Brusch    | Estados Unidos |
| 32                   | 1889  | Geslain           | França         |
| 33                   | 1889  | Tutton            | Inglaterra     |
| 34                   | 1890  | Manning           | Irlanda        |
| 35                   | 1892  | Flamant           | França         |
| 36                   | 1896  | Lang              | Alemanha       |
| 37                   | 1898  | Fournié           | França         |
| 38                   | 1902  | Hiram-Mills       | Estados Unidos |
| 39                   | 1903  | Christen          | Estados Unidos |
| 40                   | 1903* | Hazen-Williams    | Estados Unidos |
| * Verificada em 1920 |       |                   |                |

Figura B.1: Ano de desenvolvimento de fórmulas práticas.

Fonte: Azevedo, 1982

# Referências Bibliográficas

- [1] AZEVEDO NETO, J.M.; ALVAREZ, G.A., **Manual de hidráulica**. 2. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1982.
- [2] BAPTISTA, M.; LARA, M. **Fundamentos de engenharia hidráulica**. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2003.
- [3] BONATO, A.; TREVISAN, J.; SACHET, M.A.C.; NIELSEN, M. J. **Medição de água - estratégias e experimentações**. Curitiba: Optagraf Editora, 2003.
- [4] BRASIL, N.I. **Sistema internacional de unidades**. Rio de Janeiro: Interciência, 2002.
- [5] BURDEN, R.L.; FAIRES, J.D. **Análise numérica**. São Paulo: Editora Thomson, 2003.
- [6] CASSIDY, J.J.; CHAYUDHRY, M.H.; ROBERSON, J.A.; **Hidraulic Engineering**. 2. ed. New York: John Willey, 1998.
- [7] CUNHA, M.C. **Métodos numéricos**. 2. ed. São Paulo: Editora UNICAMP, 2003.
- [8] DELMÉE, G.J. **Manual de medição de vazão**. 3. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2003.
- [9] FOX, R. W.; MCDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluídos**. 5. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 1998.
- [10] GARCEZ, L. N. **Elementos de engenharia hidráulica e sanitária**. 2. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1976.
- [11] GILES, R. V. **Mecânica dos fluídos e hidráulica**. Rio de Janeiro: Editora Edgard Blücher, 1971.

- [12] GONÇALVES, H.A. **Manual de projetos de pesquisa científica**. São Paulo: Editora Avercamp, 2003.
- [13] LENCASTRE, A. **Manual de Hidráulica Geral**. Rio de Janeiro: Editora Edgard Blücher, 1972.
- [14] OLIVEIRA, A. G. **Treinamento em pascal**. Santa Catarina: Editora Bookstore, 1997.
- [15] PALMER, S. D. **Dominando o Turbo Pascal**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna, 1994.
- [16] RINALDI, R. **Turbo Pascal 7.0: comandos e funções**. São Paulo: Editora Érica, 1993.
- [17] RUGGIERO, M.A.G.; LOPES, V.R. **Cálculo numérico - aspectos teóricos e computacionais**. 2. ed. São Paulo: Editora Pearson, 1996.
- [18] SPERANDIO, D.; MENDES, J.T.; SILVA, L.H.M. **Cálculo Numérico características matemáticas e computacionais dos métodos numéricos**. São Paulo: Editora Pearson, 2003.
- [19] WALSKI, T.M.; BARNARD, T.E.; DURRANS, S.R.; MEADOWS, M.E. **Computer Applications ins Hydraulic Engineering**. Waterbury USA: Hastad Methods, 2002.